

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA  
FACULTAD DE CIENCIAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA  
ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES**



**TESIS PARA OPTAR POR EL TITULO DE INGENIERO  
ELECTRONICO Y TELECOMUNICACIONES**

**“RADIO PLANNING LTE PARA LA CIUDAD DE PIURA”**

**AUTOR:**

**Bach. CESAR AUGUSTO LOZADA TIMANA**

**ASESOR:**

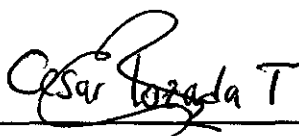
**DR. CARLOS ENRIQUE ARELLANO RAMIREZ**

**Piura**

**2016**

# "RADIO PLANNING LTE PARA LA CIUDAD DE PIURA"

TESIS PRESENTADA A LA FACULTAD DE CIENCIAS COMO  
REQUISITO PARA OPTAR EL TÍTULO DE:  
ING. ELECTRÓNICO Y TELECOMUNICACIONES



Bach. Cesar Augusto Lozada Timaná

Autor



Dr. Carlos Enrique Arellano Ramírez

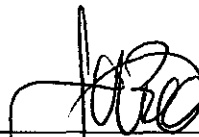
Asesor

Jurados:



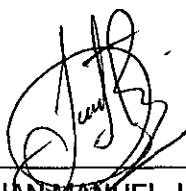
ING. MARIO AUGUSTO RAMOS ECHEVARRIA

PRESIDENTE



MSc. ING. FRANKLIN BARRA ZAPATA

SECRETARIO



MSc. ING. JUAN MANUEL JACINTO SANDOVAL

VOCAL

## DEDICATORIA

*A mis padres quienes me apoyaron y brindaron su apoyo todo el tiempo.*

*A mi esposa Ruth e Hijo Sebastián*

## **AGRADECIMIENTO**

*En primer lugar a Dios por haber hecho de su voluntad de guiarme por un buen camino de felicidad hasta ahora, en segundo lugar a mis Padres Augusto y María, mis hermanos Lisbeth, Carolina, Maximiliana y Ovidio y por ultimo a mi profesor y asesor el Dr. Carlos Enrique Arellano Ramírez, quienes en todo momento coadyuvaron de manera incondicional en el desarrollo de esta tesis.*

## **RESUMEN**

El auge de las nuevas tecnologías celulares de hoy en día ha permitido que las grandes ciudades desarrollen grandes sistemas de comunicación permitiendo grandes anchos de banda con capacidades que permiten a los usuarios acceso de banda ancha para datos e internet a grandes velocidades.

En el Perú el despliegue de esta tecnología conocida como LTE continúa cubriendo las ciudades tratando de que los operadores ofrezcan la mayor cobertura posible y lograr llegar incluso a zonas rurales.

Está presente investigación trata de diseñar la planificación de radio LTE para la ciudad de Piura abarcando los distritos de Piura y Castilla, se evalúa el Link Budget del sistema, así como el cálculo de la capacidad del sistema en función a consideraciones mínimas del sistema y por último se calcula la cantidad de estaciones base necesarias para ofrecer cobertura LTE a gran velocidad en los mencionados distritos.

Palabras Clave: EnodoB, LTE, capacidad, Link Budget.

## **ABSTRACT**

The rise of new cellular technologies today has allowed large cities to develop large communication systems enabling high bandwidth capabilities that allow users to access broadband Internet and data at high speeds.

In Peru the deployment of this technology known as LTE continues to cover cities trying operators to offer the widest possible coverage and achieve even reach rural areas.

Present research is to design planning LTE radio for the city of Piura covering the districts of Piura and Castilla, the Link Budget System and calculating the capacity of the system according to minimum system considerations evaluated and finally the amount of necessary base stations to provide coverage is calculated at high speed LTE in the mentioned districts.

Keys word: EnodoB, LTE, Capability, Link Budget

## INDICE GENERAL

PAGINA DE JURADO.....	ii
DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iv
RESUMEN.....	v
ABSTRACT.....	vi
INDICE GENERAL.....	vii
INDICE DE FIGURAS.....	xi
INDICE DE TABLAS.....	xiii
CAPITULO I.....	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1. DESCRIPCION DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA .....	1
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	2
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	3
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	3
1.4.1. Objetivo general.....	3
1.4.2. Objetivos específicos .....	3
1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.6. LIMITACIONES Y VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN .....	4
1.6.1. Limitaciones .....	4
1.6.2. Viabilidad de la investigación.....	4
1.7. ANTECEDENTES.....	4
CAPITULO II.....	9
2. MARCO TEORICO .....	9
2.1 Tecnología Celular.....	9
2.3. Antenas Múltiples .....	10
2.3.1. MIMO (Múltiples antenas en Tx y Rx) .....	10
2.4. Tecnología OFDMA y SC-OFDMA.....	14
2.4.1. Tramas de Radio: .....	14
2.4.2. Fundamentos de OFDMA y SC-FDMA .....	17

2.4.3. OFDMA .....	18
2.4.4. SC-FDMA .....	21
2.5. Banda Ancha .....	22
2.6. Asignación de Frecuencias .....	26
2.7. Red de Acceso y Transporte .....	27
2.7.1 Fibra Óptica al 2013 .....	28
2.7.2. Características técnicas .....	29
2.7.3. Acceso: Red 4G-LTE .....	29
2.7.4. Banda 1.7/2.1 GHz .....	30
2.8. Tecnología LTE – [16] .....	30
2.9. Arquitectura de una red LTE .....	31
2.9.1. Modelo de referencia.....	31
2.9.2. Packet Data Networks.....	31
2.9.3. Entidades LTE: .....	32
2.9.3.2. eNB .....	32
2.9.3.3. MME .....	32
2.9.3.4. S-GW .....	33
2.9.3.5. P-GW I .....	33
2.9.3.6. P-GW II .....	33
2.9.3.7. HSS .....	34
2.9.3.8. PCRF .....	34
2.9.3.9. SPR .....	34
2.9.3.10. OCS & OFCS .....	35
2.9.3.11. Interfaz LTE-Uu .....	35
2.9.3.12. Interfaces y Protocolos .....	36
2.9.3.13. Flujo del Tráfico I.....	36
2.9.3.14. UE a P-GW .....	38
2.9.3.15. Establecimiento de GTP-U .....	39
2.9.3.16. En GTP-C se utiliza un túnel para señalización por usuario	
Interfaz X2- I.....	39
2.9.3.17. Interfaz S10 .....	40
2.9.3.18. Identificadores LTE I .....	40
2.9.3.19. Identificadores LTE II .....	41
2.9.3.20. IDs por Entidades EPS .....	42



2.9.3.21. PLMN ID .....	42
2.9.3.22. IMSI.....	43
2.9.3.23. EI MSIN:.....	43
2.9.3.24. Dirección IP .....	43
2.9.3.25. Mobile Equipment (ME) .....	44
2.9.3.26. IMEI & IMEI/SV.....	44
2.9.3.27. IMEI & IMEI/SV.....	45
2.9.3.28. MME.....	46
2.9.3.29. Identificadores de MME .....	46
2.10. EnodoB.....	47
2.10.1. Identificadores eNB .....	47
2.10.1.1. Traking Area (TA):.....	48
2.10.1.2. Closed Subscriber Group (CSG):.....	48
2.10.1.3. P-GW ID.....	48
2.10.1.4. Ejemplo Provisión Fija P-GW .....	49
2.10.1.5. Identificadores de Localización .....	50
2.10.1.6. Asignación de TAI .....	50
2.10.1.7. Ejemplo Asignación TAI.....	51
CAPITULO III.....	53
3. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION .....	53
3.1. INGENIERIA DE PROYECTO .....	53
3.2 FUNDAMENTACIÓN.....	53
3.2.1 Modelos de propagación.....	53
3.2.2. Propagación en el Espacio Libre ( <i>Free Space</i> ).....	54
3.2.3. Propagación Okumura-Hata .....	55
3.2.4. PROPAGACIÓN COST 231 WALFISCH-IKEGAMI .....	58
3.3. CÁLCULO DE COBERTURA (LINK BUDGET) .....	62
3.3.1. Datos geográficos de la zona del proyecto .....	64
3.3.2. Link Budget.....	65
3.3.2.1. Cálculo de la sensibilidad del receptor para cada comunicación... 65	
3.3.2.2. Radio de cobertura de la celda.....	67
3.3.2.3. Área de Cobertura de la celda hexagonal .....	68
3.3.2.4. Anillos de cobertura para cada modulación .....	69
3.3.3. Capacidad del UPLINK y DOWNLINK .....	69

3.3.3.1. Cantidad de recursos para cada modulación .....	69
3.3.3.2. Capacidad total del uplink y downlink .....	70
3.3.3.3. Calculo de la cantidad de estaciones base para cubrir la demanda de usuarios residenciales y comerciales .....	70
3.3.3.4. Tasa VoIP .....	71
3.3.3.5. Cantidad máxima de usuarios residenciales .....	73
3.3.3.6. Cálculo de la capacidad y densidad de datos .....	74
3.3.3.7. Cálculo del número de estaciones base .....	76
CONCLUSIONES .....	78
RECOMENDACIONES .....	79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Células de telefonía Celular .....	10
Figura 2: Comunicación Estación Móvil con Equipo Celular.....	10
Figura 3: Antenas múltiples .....	11
Figura 4: Diversidad de transmisión (Tx/Rx) en LTE .....	12
Figura 5: MU-MIMO (Virtual MIMO) .....	13
Figura 6: Multiusuario MIMO en el enlace descendente y ascendente .....	14
Figura 7: Estructura de una trama radio de LTE .....	15
Figura 8: Representación de una señal OFDM en frecuencia y en el tiempo ..	18
Figura 9 Diagrama de funcionamiento de OFDM y OFDMA .....	20
Figura 10: Diagrama de funcionamiento de OFDMA y SC-FDMA .....	22
Figura 11: Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica 2013.....	28
Figura 12: Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica 2016.....	29
Figura 13: Modelo Red LTE .....	31
Figura 14: Red de datos por paquetes .....	31
Figura 15: S-GW .....	33
Figura 16: Interfaz LTE .....	35
Figura 17: Plano de Usuario.....	36
Figura 18: Tráfico de usuario.....	37
Figura 19: Interfaz UE a P – GW.....	38
Figura 20: Interfaz X2- I .....	39
Figura 21: Interfaz S10 .....	40
Figura 22: Identificadores LTE .....	41
Figura 23: Formato PLMN ID .....	42
Figura 24: Móvil Equipamiento .....	44
Figura 25: Formato IMEI .....	45
Figura 26: Composición de IMEI .....	46
Figura 27: Identificadores MME .....	47
Figura 28: Identificadores del eNB.....	47
Figura 29: P-GW ID.....	49
Figura 30: Provisión Fija P-GW.....	49
Figura 31: Identificadores de Localización .....	50
Figura 32: Ejemplo Asignación.....	52

Figura 33: Distrito de Piura y Castilla.....	65
Figura 34: Radios de cobertura en el uplink y downlink .....	68
Figura 35: Radio de cobertura y área de cobertura .....	69

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ancho de banda para bloques de recurso .....	15
Tabla 2: Categoría de Terminales de LTE Versión 8.....	17
Tabla 3: Bandas de frecuencias asignadas a LTE-FDD .....	26
Tabla 4: Bandas de frecuencias asignadas a LTE – TDD .....	27
Tabla 5: Protocolos LTE .....	36
Tabla 6: Pérdidas en el espacio libre .....	56
Tabla 7: Método Okumura - Hata , Frecuencia 1700Mhz - 2100Mhz .....	57
Tabla 8: Método COST231 WALFISH-IKEGAMI, Frecuencia 1700Mhz - 2100Mhz.....	62
Tabla 9: Parámetros equipos Downlink .....	63
Tabla 10: Parámetros equipos Uplink.....	63
Tabla 11: Configuración de transmisión (ancho de banda) .....	64
Tabla 12: Población y superficie del proyecto .....	64
Tabla 13: Inputs para hallar la sensibilidad .....	66
Tabla 14: Sensibilidad en función de la modulación y codificación. ....	66
Tabla 15: Radio de cobertura en el downlink .....	67
Tabla 16: Radio de cobertura en el uplink.....	67
Tabla 17: Anillos de cobertura.....	69
Tabla 18: Capacidad del uplink y downlink.....	70
Tabla 19: Datos referenciales distritos de Piura y Castilla .....	70
Tabla 20: Capacidad por servicio.....	71
Tabla 21: Header capa 3 .....	71
Tabla 22: Header capa 1 y 2 .....	72
Tabla 23: Data .....	73
Tabla 24: Cálculo del número de clientes.....	74
Tabla 25: Parámetros de tráfico .....	75

Tabla 26: Capacidad utilizada por los clientes residenciales .....	75
Tabla 27: Capacidad utilizada por los clientes corporativos .....	75
Tabla 28: Resultados .....	76

## **CAPITULO I**

### **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1. DESCRIPCION DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA**

En el mundo el avance de las tecnologías de información y comunicaciones ha permitido un incremento muy significativo en el uso de redes sociales, así como transmisiones de video. Esto ha incrementado el flujo de grandes tasas de datos en las redes telefónicas, requiriendo cada vez más ancho de banda para poder dar servicio a los usuarios de manera óptima.

El uso de las tecnologías de radio como son telefonía celular, wifi son cada vez más usadas, según GSMA Mobile Economía 2016 “2015 ha sido un año de crecimiento continuo en la industria móvil, con más de 7,6 mil millones de conexiones móviles (que representan 4.7 millones de suscriptores únicos) y los ingresos del operador de más de \$ 1 billón.” (<http://www.gsma-mobile-economy.com/#sthash.OJM7hLFe.dpuf>).

“La tecnología móvil juega un papel central en el tratamiento de una serie de desafíos para el desarrollo socio-económico en todo el mundo en desarrollo, en particular la inclusión digital y financiera.

Esto impulsará el desarrollo económico, la infraestructura, el aumento de la productividad y el empleo en toda la economía, así como mejora en el acceso a servicios vitales como la educación y la asistencia sanitaria. La industria del dinero móvil es ahora ampliamente establecida, con lo que permitirá la inclusión financiera a un número cada vez mayor de las poblaciones que anteriormente no tienen cuenta bancaria en todo el mundo en desarrollo.

A finales de 2015, 2,5 millones de personas en todo el mundo en desarrollo accedieron a Internet a través de dispositivos móviles, cifra que se incrementará en más de 1,3 millones en 2020. Sin embargo, más del

40% de la población en el mundo en desarrollo aún carecen de acceso a Internet a finales de la década" (<http://www.gsmamobileeconomy.com>)

Actualmente la evolución de las tecnologías móviles nos permite tener más capacidad, más velocidad de la información y más ancho de banda. En el Perú con la llegada de la telefonía móvil de cuarta generación 4G LTE ha permitido los operadores telefónicos desplieguen sus redes en las grandes ciudades beneficiando a miles de usuarios, sin embargo este despliegue se ha realizado de manera lenta y no en su totalidad en algunas ciudades, esto debido a factores económicos, sociales debido al desconocimiento de la gente en lo que se refiere al temor por las antenas colocadas en las estaciones de radio, situación que cambiaría ya que al colocar muchas estaciones radio base estas reducirían su potencia de transmisión incluso los equipos móviles trabajarían a menor potencia, resultando en menor radiación, menor gasto y mayor calidad en las comunicaciones y servicios.

La ciudad de Piura es una ciudad con fuerte desarrollo potencial que ha incrementado la cantidad de usuarios de telefonía móvil, ocasionando gran tráfico de datos y mayor requerimiento de ancho de banda, en ese sentido se desarrolló en esta investigación el planeamiento de radio LTE para la ciudad de Piura abarcando los distritos de Piura y Castilla

## **1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

El problema radica a la gran demanda de servicios y Tics que ocasionan gran cantidad de ancho de banda y velocidades de información cada vez más mayores, al ser LTE una tecnología emergente surge el interés en realizar el planeamiento de radio LTE para la ciudad de Piura.

Es por ello que se planteó una solución basado en el diseño de la planificación de radio LTE aplicando métodos y fórmulas para determinar la cantidad de estaciones necesarias para cubrir la ciudad, utilizando



técnicas para optimizar el funcionamiento en el acceso a redes móviles y ofrecer una excelente calidad de servicio.

### **1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Será posible realizar el Radio Planning LTE en la ciudad de Piura?

### **1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.4.1. Objetivo general**

- Realizar el Radio Planning LTE en el la ciudad de Piura

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Realizar el Link Budget LTE para la ciudad de Piura.
- Calcular la capacidad del sistema.
- Calcular la cantidad de estaciones base necesarias para dar cobertura LTE a los distritos de Piura y Castilla

### **1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN**

Para el desarrollo del presente proyecto primero se realizó el diseño del enlace (Link Budget) para calcular la cantidad de estaciones radio base se necesitaran para dar cobertura 4G LTE en la ciudad de Piura, asimismo se evaluó la capacidad que tendrá el sistema y por último se evaluó los costos de la implementación del proyecto.

Esta investigación es importante ya que contribuye al conocimiento ya que será de interés para que un operador telefónico pueda implementar cobertura total de la tecnología 4G-LTE y de esta manera de implementarse pueda beneficiar a todos los piuranos con servicio de mayor

velocidad, más ancho de banda y más calidad en los servicios móviles presentes y futuros.

## **1.6. LIMITACIONES Y VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.6.1. Limitaciones**

Las posibles limitaciones que se pueden dar:

- La limitación más significativa es saber las tecnologías y herramientas que usan los Operadores Móviles, ya que dicha información es totalmente confidencial y de difícil acceso.

### **1.6.2. Viabilidad de la investigación**

Se evaluó los requerimientos mínimos para la viabilidad del sistema determinados para el desarrollo de esta investigación los cuales se encuentran disponibles basados en estudios de mercado y al alcance del investigador, se realizó investigación bibliográfica y se contó con asesoría técnica especializada.

## **1.7. ANTECEDENTES**

Existen diversas investigaciones desarrolladas en el Perú y el Mundo sobre planificación LTE como son:

Según Milla, José (2012) en su tesis titulada "Diseño de una red LTE para el distrito del Callao" nos dice: En la presente tesis se plantea el diseño de una red LTE para el distrito del Callao para una nueva operadora que quiere ofrecer sus servicios con dicha red. En este diseño se toma en cuenta no sólo a la población que habita el distrito del Callao, sino también a aquellas que visitan con frecuencia el mismo y aquel grupo de personas que concurren diariamente al Aeropuerto Internacional Jorge Chávez que se encuentra en dicho distrito.

Por lo tanto, el objetivo de esta tesis es realizar el diseño de una red LTE para el distrito del Callao, debido a que es uno de los distritos de la Provincia Constitucional del Callao donde mejor se podrá aprovechar esta

red ya que cuenta con diferentes establecimientos deportivos, sectores industriales y, sobre todo, con el Aeropuerto Internacional Jorge Chávez donde se generará gran cantidad de tráfico. Por lo que, con este diseño, se desea satisfacer la demanda que se genere en el distrito.

Como conclusiones Milla menciona que:

- El despliegue de una red LTE en el distrito del Callao no presenta mayores problemas en lo que respecta a la red de transporte, ya que al tratarse de un distrito costero, se cuenta con una demografía ideal para el despliegue de redes móviles. Es por ello que es importante indicar que este modelo aplica generalmente para zonas costeras con bajo relieve demográfico. Para localidades de la sierra o selva sería distinto ya que es muy probable que se necesite emplear repetidores, mayor cantidad de amplificadores, femtoceldas o picoceldas.
- Se corroboró que LTE es una tecnología que brinda mejoras tecnológicas que se ven reflejadas en las velocidades de transmisión de datos, así como en la cobertura y calidad de servicio de la señal.
- Con respecto al análisis económico, se ha demostrado que el proyecto es rentable, tomando en cuenta de que el proyecto está diseñado para el despliegue de una red LTE de una empresa operadora nueva. Por lo que si se tratase de una empresa operadora que ya trabaja en el país, la inversión sería menor y por consiguiente, las ganancias y la rentabilidad del proyecto serán mayores.

Por otro lado Guinand, Cristina (2012) en su tesis titulada "Planificación de una red LTE con la herramienta ATOLL y análisis de impacto de las estrategias de packet scheduling" nos plantea: Al surgir el sistema LTE de cuarta generación de telefonía móvil y además hacerse disponible en el mercado herramientas que permiten modelar estas redes, surgió la necesidad de extender los conocimientos teóricos al ámbito práctico para observar el comportamiento de estas redes bajo diferentes condiciones y establecer comparaciones con los resultados esperados. En este sentido, el presente Proyecto de Fin de Carrera tiene como objetivo la planificación de

una red LTE en la herramienta ATOLL para crear situaciones que permitan analizar el rendimiento de la red al emplear distintas estrategias de Packet Scheduling.

La metodología utilizada en el proyecto consistió en una primera fase de investigación teórica, no solo de las especificaciones del sistema LTE sino también de los algoritmos empleados en el programa para llevar a cabo los distintos cálculos necesarios referentes a las funciones de gestión de los recursos radios y obtención de los throughputs por usuario, por celdas y totales de la red. Posteriormente se emprendió la fase de planificación de la red LTE escogiendo la ciudad de Barcelona como zona para el despliegue, se procedió a la optimización de la red y finalmente se realizaron distintas simulaciones y predicciones para evaluar las estrategias Round Robin, Proportional Fair, Proportional Demand y Maximum C/I.

Como resultado general del proyecto se logró alcanzar un alto dominio de la herramienta ATOLL en la planificación de redes LTE, así como obtener el criterio para evaluar y establecer parámetros del programa según valores realistas que permitan obtener resultados acorde a los documentos teóricos.

Del mismo modo **Manosalvas, Henry & Santamaría, Adriana (2012)** en su tesis titulada “Estudio, diseño y simulación de una red LTE (Long Term Evolution) para telefonía móvil en los valles de Tumbaco y los Chillos utilizando software predictivo” nos plantea: El presente proyecto tiene por objetivo el diseño y simulación de una red LTE (Long Term Evolution), en los valles de Tumbaco y de los Chillos, motivado por el cambio constante de la tecnología en lo que se refiere al avance de las comunicaciones móviles. El desarrollo de este trabajo resulta beneficioso para los usuarios de telefonía móvil porque mejoraría considerablemente las características que resultan más perceptibles al usuario como velocidad y mayores aplicaciones, dentro del aspecto técnico, permite el uso más eficiente del espectro radioeléctrico.

LTE se muestra como una verdadera tecnología móvil de banda ancha que permitirá a los usuarios tener servicios con mejor calidad.

La tecnología LTE es viable, y de hecho las exigencias del usuario orientado cada vez a mayores velocidades y nuevos servicios, obligará de cierta forma a las operadoras a migrar a esta tecnología, y por esto es necesario que se realice un estudio a nivel de las entidades encargadas de la regulación de telecomunicaciones en el País, como SENATEL, para que se asigne la banda de frecuencias en la que las operadoras podrían desarrollar redes basadas en tecnología LTE.

Fue necesario realizar un monitoreo de las UTRAN existente en los valles de Tumbaco y los Chillos para evaluar la velocidad de carga y descarga, la latencia y el tipo de red que para estos sectores es UMTS con sus canales de alta velocidad que es HSPA, utilizando un software conocido como SpeedTest.net certificado por la FCC.

El software para simulaciones de redes radioeléctricas SIRENET Profesional, fue utilizado para evaluar sobre un modelo de propagación parámetros como la cobertura y solapamiento de la señal, utilizando mapas digitales que permiten visualizar el relieve y este a su vez facilita encontrar los puntos muertos de la señal producida con valores de sensibilidad = -112 dBm, por las características propias del terreno en los Valles de Tumbaco y los Chillos.

Los resultados de SIRENET profesional permitieron tomar decisiones en cuanto a los puntos geográficos, y en qué lugar se debería colocar las EUTRAN para evitar que una EUTRAN brinde cobertura sobre una zona que ya se encuentra considerada por otras zonas que no estén consideradas.

El segundo software utilizado fue QualNet, el propósito de emplearlo fue el de poder ampliar el aspecto de la simulación y enfocarlo hacía otro punto importante como la evaluación del desempeño de la red al inyectar distintos tipos de Tráfico, permitiendo ingresar las especificaciones técnicas establecidas por la 3GPP.

Los resultados obtenidos en QualNet, permite comparar la velocidad de carga y descarga teórica y estos resultados a la vez con las redes HSPA instalada en los valles de Tumbaco y los Chillos, permitiendo contrastar con el desempeño de la red LTE simulada, obteniendo altas velocidades en la transferencia de datos, utilizando varios usuarios con diferentes protocolos de transportes al mismo tiempo como son el CBR con velocidad de 18,3 Mbps hasta 40,9 Mbps, VBR, Telnet con velocidad de 5 hasta 8 bps.

La posibilidad de migrar el sistema actual de telefonía celular a cuarta generación en los Valles de Tumbaco y Los Chillos, es viable, aunque este implica retos que abarcan aspectos tanto tecnológicos como económicos para las operadoras de telefonía celular; mejorando la calidad de servicio, calidad de experiencia, que implica utilizar dispositivos móviles que permitirán potencializar todos los servicios de la red LTE.

El estudio del tráfico procura tomar en cuenta las consideraciones sobre las necesidades tanto en capacidad como velocidad que en corto plazo demandará la red móvil. Por este motivo se tomó en cuenta parámetros como la densidad de usuario, que toma en cuenta el aumento de EUTRAN's necesarias para cubrir los requerimientos y expectativas de la red diseñada, eficiencia espectral, demanda de tráfico.

## CAPITULO II

### 2. MARCO TEORICO

#### 2.1 Tecnología Celular

La comunicación en telefonía celular ha evolucionado teniendo sus inicios con la aparición de la generación 0G, que no llegó a establecerse en Perú. La generación 1G estuvo destinada a una transferencia analógica y estrictamente de voz, la cual si llegó a Perú. La generación 2G hizo su aparición debido a la insuficiencia de soporte de los espectros de frecuencia. Esta generación se caracterizó por los circuitos digitales de datos conmutados por circuitos y la introducción de la telefonía rápida y avanzada a las redes, con protocolos de codificación más sofisticados, tales como: CDMA (Code Division Multiple Access) y GSM (Global Systemfor Mobile communications). El protocolo GPRS, desarrollado por el sistema GSM, permitía a los usuarios compartir un mismo canal de transmisión de paquetes de información, evolucionando al protocolo EDGE (Enhanced Data Ratesfor GSM Evolution) con un nuevo esquema de modulación de frecuencia, que mejoró la transferencia de información [1]. La aparición de la generación 3G se debió más a un tema de requerimientos que de actualizaciones de tecnologías (2 Mbit/s de máxima tasa de transferencia en ambientes cerrados, y 384 kbit/s en ambientes abiertos) [2]. Actualmente, Perú hace uso de la tecnología 2G, 3G y 4G.

Fraccionar una ciudad en determinadas áreas permite distribuir la frecuencia y poder ser reutilizada permitiendo que los usuarios puedan comunicarse entre sí, poder trasladarse de un lugar a otro sin que su comunicación sea interrumpida ,cada célula está conformada por una estación base la cual cuenta con equipos de radiofrecuencias. En la imagen se aprecia la distribución de una red Celular en forma de celdas.

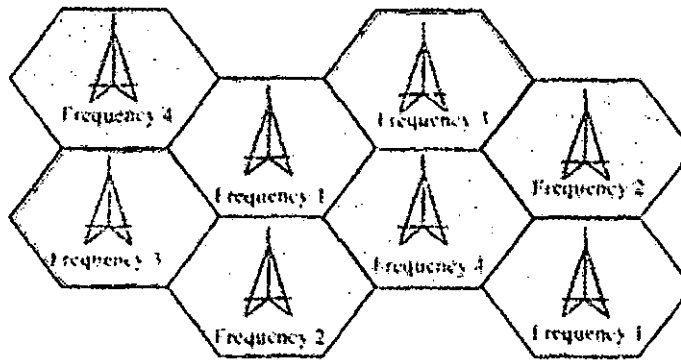


Figura 1: Células de telefonía Celular [3]

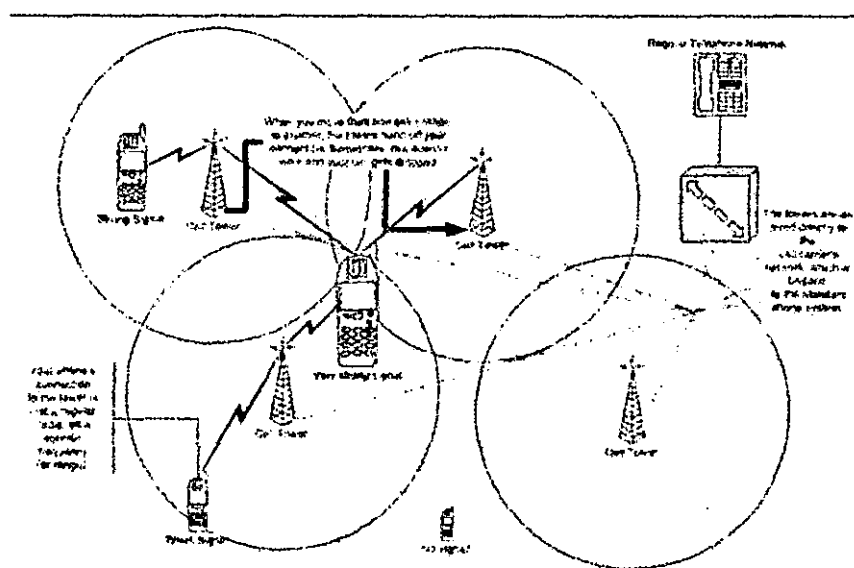


Figura 2: Comunicación Estación Móvil con Equipo Celular. [4]

En la figura 2 se puede visualizar que el móvil se encuentra en un área de cobertura, el cual puede trasladarse de un punto a otro y no perder la comunicación, ya que si se aleja de su celda inicial la celda más próxima dará cobertura al móvil.

## 2.3. Antenas Múltiples

### 2.3.1. MIMO (Múltiples antenas en Tx y Rx)

Uno de los componentes claves en LTE para alcanzar la eficiencia espectral es el uso de múltiples antenas en transmisión y recepción (MIMO, Multiple Input Multiple Output). Se utilizan para aumentar la cobertura y la



capacidad de la capa física. La adición de más antenas para sistema radio da la posibilidad de mejorar en el rendimiento, debido a que la radiación de las señales se realizará por caminos físicos diferentes y llegarán con distintos retardos al receptor.

Dependiendo del número de antenas en transmisión y en recepción, los sistemas reciben distintos nombres: SISO (Una antena en transmisión y una en recepción), SIMO (Una antena en transmisión y múltiples en recepción, es un sistema de diversidad de recepción) y MIMO (Múltiples antenas en transmisión y múltiples antenas en recepción). Todos estos sistemas se muestran en la Figura 3.

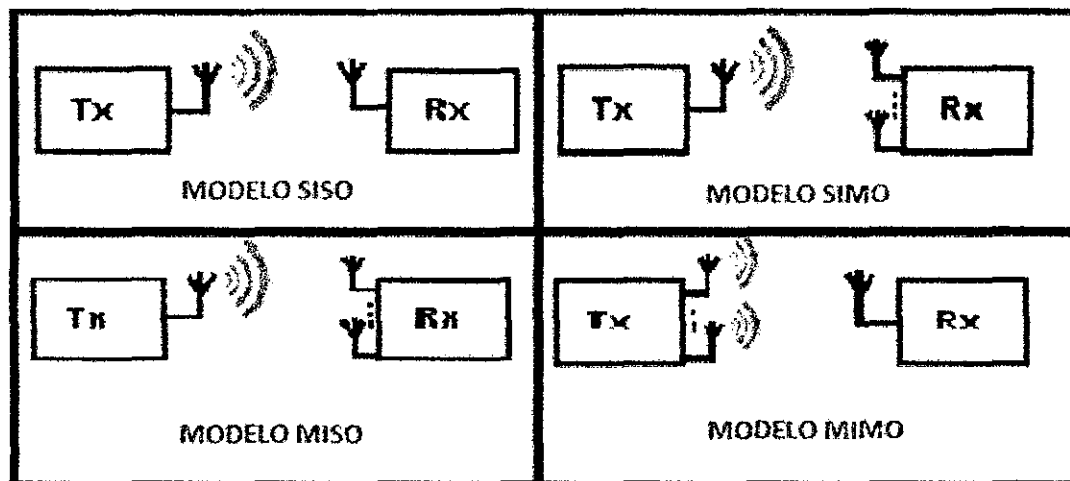


Figura 3: Antenas múltiples [5]

MIMO aumenta la capacidad del espectro por la transmisión de múltiples flujos de datos simultáneamente en la misma frecuencia y tiempo, aprovechando al máximo las diferentes rutas en el canal de radio. En LTE la tecnología MIMO se utiliza ampliamente y se han definido diferentes esquemas, tanto para el enlace ascendente como el descendente. La Release 8 de 3GPP soporta diversas configuraciones de antena MMO. Esto incluye protocolos de usuario único (SU- MIMO) y multiusuario (MU- MIMO), que usan el modo de circuito abierto o bien de circuito cerrado, así como también diversidad de transmisión, con hasta 8 capas espaciales en DL y hasta 4 en UL. El modo MIMO de circuito cerrado, que da soporte a las tasas máximas

más elevadas, será probablemente el esquema más comúnmente empleado en las primeras implantaciones. Sin embargo, este esquema MIMO de circuito cerrado provee el mejor rendimiento solamente cuando la información del canal es exacta, cuando hay un rico entorno multitrayecto, y es apropiado en entornos de movilidad baja como el que se da en caso de terminales fijos o de aquellos utilizados a velocidades peatonales.

El esquema de SU-MIMO (monousuario) se ha especificado para la configuración con dos o cuatro antenas de transmisión en el enlace descendente, que admite la transmisión de múltiples capas espaciales, con un máximo de 4 por equipo de usuario. También se ha especificado un esquema de "diversidad de transmisión" Figura 3 para la configuración con dos o cuatro antenas de transmisión en el enlace descendente y con dos antenas en el enlace ascendente.

El esquema de MU-MIMO (multiusuario) permite la asignación de diferentes capas espaciales (hasta 8) a diferentes usuarios en el mismo recurso tiempo-frecuencia, y se apoya en los dos enlaces ascendente y descendente. De cara a mejorar el rendimiento, se utilizan unas matrices de precodificación (Pre-coder), tanto en SU-MIMO como en MU-MIMO para controlar /reducir la interferencia entre los flujos de datos espaciales multiplexados.

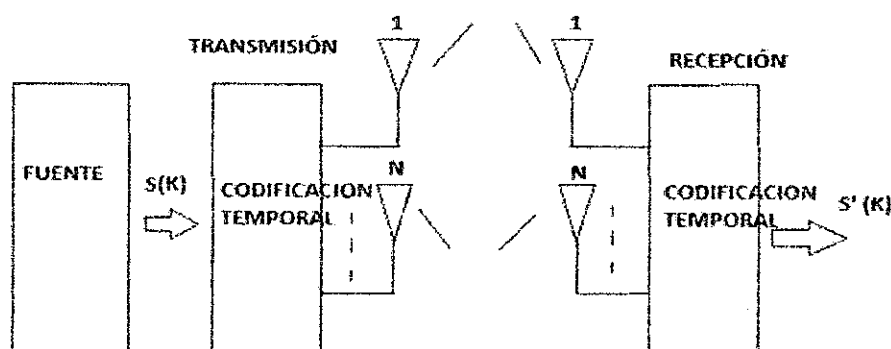


Figura 4: Diversidad de transmisión (Tx/Rx) en LTE  
[Elaboración Propia]

Respeto a MU-MIMO, también llamado MIMO virtual, por estar formado por varios terminales y la estación base, aunque no aumenta la tasa de un usuario individual de datos, ofrece ganancias en la capacidad de la celda.

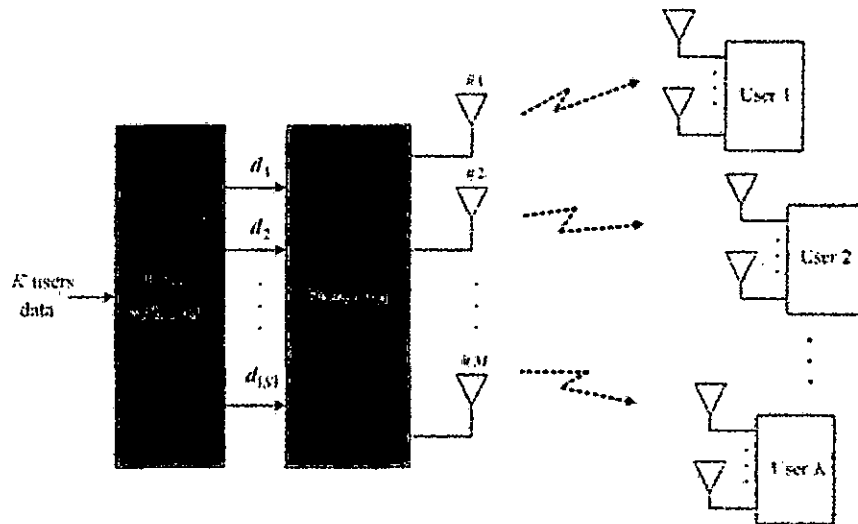


Figura 5: MU-MIMO (Virtual MIMO) [6]

Los beneficios teóricos de MIMO son función del número de antenas de transmisión y antenas de recepción, las condiciones de propagación radio, la capacidad del emisor para adaptarse a las condiciones cambiantes, y el SNR (Relación señal a ruido). El caso ideal es aquel en el que los caminos en el canal de radio están completamente correlacionados, casi como conexiones separadas físicamente por cable, sin la interferencia existente entre los transmisores y receptores. Estas condiciones son casi imposibles de lograr en el espacio libre, y con el potencial de muchas variables, no es ni útil ni posible citar las ganancias MIMO sin especificar las condiciones en las que se han obtenido.

Para el enlace ascendente se han definido tres tipos de técnicas de antenas múltiples: Diversidad en el enodoB, SU-MIMO para un solo UE y MU-MIMO para múltiples UE. Para llevar a cabo SU-MIMO se requieren dos transmisores en el UE. Éste es un importante desafío en términos de costo, tamaño y consumo de batería, y por estas razones el desarrollo de SU-MIMO no es actualmente una prioridad. Además, los datos de aumento de las tasas en el enlace ascendente que podría ser posible a partir de SU-MIMO no son

tan importantes como se encuentran en el enlace descendente, debido a la distribución del tráfico asimétrico.

En la figura 6 se representa un sistema MU-MIMO. Los dos flujos de datos se originan en diferentes UE. En este escenario es importante seleccionar correctamente los terminales que formarán parte del sistema MIMO. [ 7]

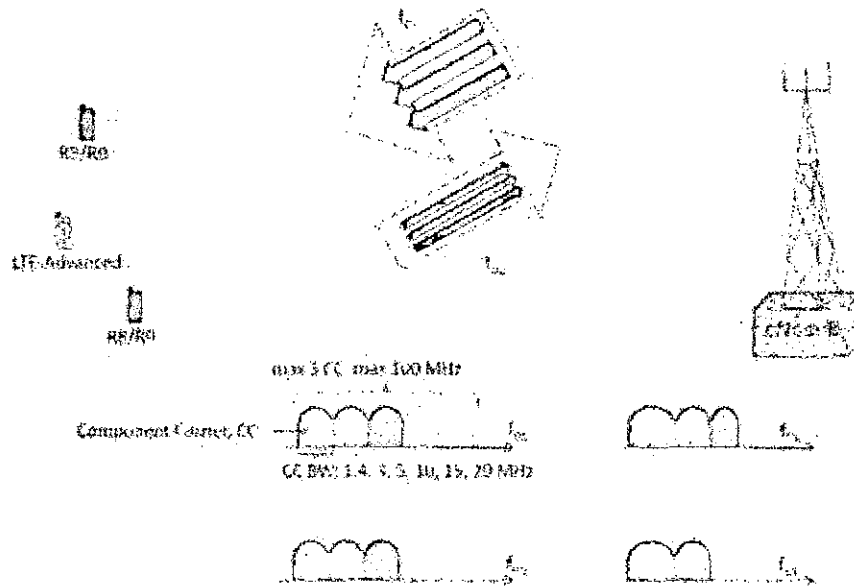


Figura 6: Multiusuario MIMO en el enlace descendente y ascendente [8]

## 2.4. Tecnología OFDMA y SC-OFDMA

### 2.4.1. Tramas de Radio:

La menor cantidad de recursos que pueden ser asignadas por el eNodeB a un terminal móvil en el enlace ascendente o descendente se llama un bloque de recursos (RB, Resource Block). Es la unidad más pequeña en la capa física y por ello se denomina también como PRB (Physical Resource Block). Un RB ocupa físicamente 0,5 ms (1Slot) en el dominio del tiempo y 180KHz en el dominio de la frecuencia. El número de sub-portadoras por RB y el número de los símbolos por RB varían en función de la longitud del prefijo cíclico (CP) y del espacio entre sub-portadoras, según se muestra a continuación.

Tabla 1: Ancho de banda para bloques de recurso [9]

Canalización (MHz)	1.25	2.5	5.0	10.0	15.0	20.0
Número de RB	6	12	25	50	75	100

OFDMA es una excelente elección del esquema de multiplexación para el enlace descendente 3GPP LTE. Aunque se trata de la complejidad añadida en cuanto a la programación de recursos, que es muy superior a los enfoques de paquetes orientada en términos de eficiencia y la latencia. En OFDM, los usuarios se les asignan un número específico de subportadoras para un periodo de tiempo predeterminado. Estos se conocen como bloques de recursos físicos (PRBS) en las especificaciones de LTE. Por lo tanto las PRB tienen tanto una dimensión de tiempo y frecuencia. La asignación de las PRB se controla mediante una función de programación en la estación base 3GPP (eNodeB).[9]

En el estándar LTE, un RB cuenta con 12 subportadoras consecutivas con un espaciado entre ellas de 15kHz, lo que, para mantener la ortogonalidad, da una longitud de símbolo de  $1/15\text{kHz} = 66,7\mu\text{s}$ . Las tramas de radio FDD duran 10ms y están divididas en 20 slots de 0,5 ms, tal como muestra en la figura 7 .El tamaño máximo de un bloque de información es de 6.144 bits, y se utiliza el algoritmo CRC-24 para la detección de errores.

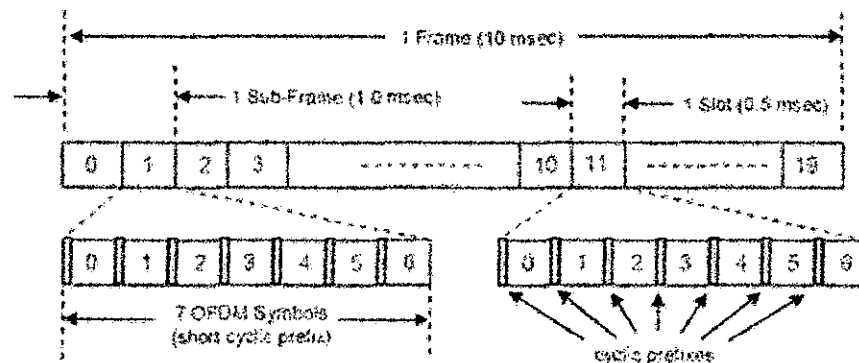


Figura 7: Estructura de una trama radio de LTE [9]

La estimación de la tasa de picos de datos (o velocidades máximas de transmisión), que se consideren viables para el sistema LTE, en condiciones

ideales, están en el rango de 100 a 326,4 Mbt/s en el enlace descendente (DL) y de 50 a 86,4 Mbit/s en el enlace ascendente (UL), en función de la configuración de la antena y esquema de modulación. Estas tasas representan el máximo absoluto que el sistema podría soportar; sin embargo los valores reales se han reducido para adaptarlos a las categorías de terminales (UE, User Equipment) definidas, que se muestran en la tabla 2, así como las características soportadas.

LTE utiliza una serie de mecanismos en la capa física para mejorar el rendimiento y reducir la latencia. Entre ellos están la petición de repetición automática híbrida (HARQ) y la modulación y codificación adaptativa (AMC).

HARQ (Hybrid Automatic Repeat ReQuest) es una técnica para asegurar que los datos se envíen de forma fiable, identificando cuándo se producen errores de transmisión y facilitando la retransmisión desde la fuente (enodo B). LTE utiliza el protocolo HARQ tipo II- , similar a como lo hacen HSPA y HSPA +. AMC (Adaptative Modulación and Coding) es el mecanismo utilizado para mejorar el rendimiento de los datos en un canal con desvanecimiento .Esta técnica varía el esquema de modulación y de codificación del enlace descendente sobre la base de las condiciones del canal de cada usuario. Cuando la calidad del enlace es buena, el sistema LTE puede utilizar un esquema de modulación de orden superior (más bits por símbolo) o menos bits en la codificación del canal, que se traduce en velocidades de datos superiores. Cuando las condiciones del enlace son pobres, debido a problemas tales como desvanecimiento de la señal o interferencia, el sistema puede utilizar una profundidad de modulación más baja o una codificación más fuerte de canal para mantener unos márgenes aceptables en el enlace radio.

Tabla 2: Categoría de Terminales de LTE Versión 8 [7]

Categoría		1	2	3	4	5
Pico per ratio	Descida	10	50	100	150	300
	Subida	5	20	50	50	75
Capacidad para funciones físicas						
Ancho de banda RF		20 MHz				
Modulación	Descida	QPSK, 16QAM, 64QAM				
	Subida	QPSK, 16QAM				QPSK 16QAM 64QAM
Multi-antena						
Diversidad 2 Rx		Requerimiento de rendimiento asumidos				
2x2 MIMO		No soportado				Obligatorio
4x4 MIMO		No soportado				Obligatorio

Los procedimientos de control de potencia incluyen la asignación de la potencia ascendente y el control de potencia en el enlace descendente. El control de potencia en sistemas OFDMA es menos crítico que en los sistemas CDMA , ya que con OFDMA las señales están separadas en el tiempo y en la frecuencia , mientras que en CDMA deben compartir el mismo canal físico y se separan por la difusión del código , que requiere de límites mucho más estrictos sobre la potencia recibida. La importancia del control de potencia crece con la MU-MIMO que funciona mejor cuando la potencia recibida de cada UE en el eNode B está equilibrada.

#### 2.4.2. Fundamentos de OFDMA y SC-FDMA

Como ya se ha comentado respecto a la tecnología radio en LTE, ésta se basa en el uso de acceso múltiple por división ortogonal de frecuencia (OFDMA) para el enlace descendente (DL), y de acceso múltiple en frecuencia con una sola frecuencia portadora (SC-FDMA) para el enlace ascendente (UL).

La modulación de las subportadoras se hace con alguna variante de QAM con  $M$  estados de modulación, según una constelación en ejes  $I$  y  $Q$  .Cada símbolo de modulación es un punto de la constelación representado por un número complejo que corresponde a  $\log_2 M$  bits; por lo que cada símbolo OFDM consta de  $N_2 * \log_2 M$  bits y su período es:

$$T_{\text{útil}} = T_b * N_c * \log_2 M$$

Siendo  $T_b$  el periodo de bit, y  $N_c$  el número de canales (Subportadora)

### 2.4.3. OFDMA

OFDMA es una variante de la multiplicación por división ortogonal de frecuencia (OFDM), ampliamente utilizada en sistemas inalámbricos, pero relativamente nueva para sistemas celulares. Se hace uso de un gran número de subportadoras se modula con un esquema de modulación convencional (por ejemplo, QPSK, 16 QAM O 64 QAM) a una cierta velocidad de símbolo baja. La combinación de estas subportadoras permite alcanzar altas velocidades de datos.

El diagrama de la figura 8 muestra las principales características de una señal de OFDM en frecuencias y en el tiempo. En el dominio de la frecuencia, múltiples tonos adyacentes o subportadoras son cada uno, independiente, modulados con datos. Entonces, en el dominio del tiempo, se insertan los intervalos de guarda entre cada uno de los símbolos para evitar la interferencia entre ellos (ISI) en el receptor, causada por el retraso debido al efectuar la señal varios caminos de difusión (multipath) en el canal de radio

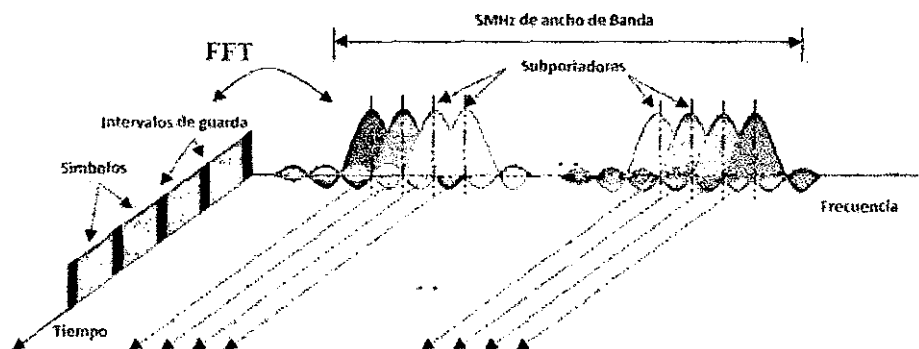


Figura 8: Representación de una señal OFDM en frecuencia y en el tiempo [10]

A pesar de que OFDM se ha utilizado durante muchos años en los sistemas de comunicación, su uso en disposiciones móviles es más reciente. El ETSI (Instituto Europeo de Estándares de telecomunicaciones) estuvo



evaluando OFDM para GSM a finales de los años ochenta; sin embargo, la capacidad de procesamiento necesaria para llevar a cabo las operaciones requeridas (como la FFT : transformada rápida de Fourier , una parte clave en OFDM) se consideró en ese momento demasiado cara y exigente para un terminal móvil . En 1998, el 3GPP consideró seriamente OFDM para UMTS, pero de nuevo eligió una tecnología alternativa basada en el acceso múltiple por división de código (CDMA). Hoy en día el costo de procesamiento de la señal digital se ha reducido considerablemente y OFDM se considera un método comercialmente viable de transmisión radio.

En comparación con la tecnología CDMA en la que se basa UMTS, OFDM ofrece las siguientes ventajas:

- ✓ OFDM se puede escalar fácilmente a canales de ancho de banda diferentes, cubriendo un amplio rango.
- ✓ Los ecualizadores de canal OFDM son mucho más simples de implementar que los DMA, ya que la señal OFDM está representada en el dominio de la frecuencia más que en el temporal.
- ✓ OFDM es más resistente a la dispersión de retardo multitrayecto. Esto es así porque los símbolos OFDM pueden separarse por un intervalo de guarda (  $T_g = T_{CP}$  ) que se conoce como el prefijo cíclico (CP). El CP es una copia del final de un símbolo que se inserta al principio. Mediante el muestreo de la señal recibida en el momento óptimo, el receptor puede eliminar la interferencia en el dominio del tiempo de símbolos adyacentes causada por múltiples rutas en el canal de radio.
- ✓ OFDM es más adecuada MIMO, La representación en el dominio de la frecuencia de la señal permite una precodificación fácil para que coincida con la señal de la frecuencia y fase características del canal de radio de los distintos caminos (multipath).

Sin embargo, OFDM también presenta algunas desventajas. Por ejemplo, las subportadoras están estrechamente espaciadas y eso hace de OFDM muy sensible a los errores de frecuencia y ruido de fase. Por la misma razón, OFDM es también sensible a la frecuencia Doppler, lo que provoca interferencias entre

las subportadoras. OFDM también tiene el problema del valor alto de la relación de potencia de pico a potencia media (PAPR), lo que ha obligado a la definición de SC-FDMA para el enlace ascendente. Una de las ventajas clave de los sistemas OFDM (SC-FDMA en este contexto) es la capacidad de proteger contra la dispersión del retardo multitrayecto.

Las transmisiones de diferentes terminales (UE) en OFDM podrían sufrir desvanecimiento e interferencia de banda estrecha, por lo que para el enlace descendente 3GPP eligió OFDMA, que incorpora elementos de TDM (Time División Multiple Acces). OFDMA asigna de forma dinámica entre los usuarios subconjuntos de las subportadoras y el resultado es un sistema más robusto, con mayor capacidad, lo que se debe a la eficiencia de trunking de multiplexación de los usuarios y a la posibilidad de organizar a los usuarios para una mayor resistencia al desvanecimiento de frecuencia selectivo.

En OFDMA, la forma de trabajo consiste en la separación de una sola señal en subportadoras, es decir, en dividir una señal extremadamente rápida e numerosas señales más lentas que optimicen el acceso móvil, y con los subcanales formados se pueden transmitir los datos sin estar sujetos a las interferencias y a la intensidad de la distorsión de trayectoria múltiple a la que se enfrenta la transmisión de una única portadora. Las subportadoras múltiples se recogen en el receptor y se recombinan para formar una transmisión de alta velocidad.

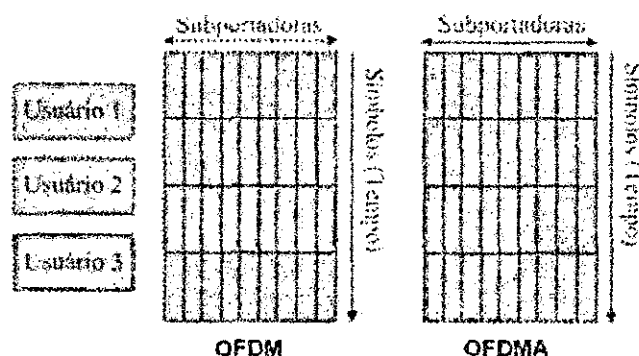


Figura 9: Diagrama de funcionamiento de OFDM y OFDMA [11]

La diferencia entre OFDM y OFDMA tiene la capacidad para asignar dinámicamente un subconjunto de las subportadoras a los usuarios individuales, haciendo de ésta la versión multiusuario de OFDM (OFDMA soporta simultáneamente múltiples usuarios mediante la asignación de los subcanales específicos para los intervalos de tiempo). En la figura 9 se muestra la diferencia entre OFDM y OFDMA.

Uno de los parámetros clave que afecta a todos los móviles es el de la duración de las baterías. A pesar de que si rendimiento esta mejorado a los largo del tiempo, todavía es necesario asegurar que los móviles utilicen la menor cantidad posible de energía de la batería. Por ello, los terminales han de operar de modo eficiente en las etapas de amplificación de potencia. El resultado puede verse afectado significativamente por la modulación de radio frecuencia (RF) y el formato de la señal , ya que las señales que tienen una relación alta de potencia de pico a potencia media no se prestan para el uso eficiente de los amplificadores de potencia radio. Desafortunadamente, como ya hemos comentado, OFDM tiene una relación PAPR alta el terminal móvil. Como resultado, LTE utiliza para el UL un esquema de modulación conocido como SC-FDMA que es un formato híbrido.

#### **2.4.4. SC-FDMA**

SC-FDMA fue elegido para el UL de LTE, ya que combina las técnicas de PAPR bajo, como GSM y CDMA, con la resistencia a interferencias y con la atribución de frecuencias flexible de OFDMA. En SC-FDMA, los símbolos de datos en el dominio del tiempo se convierten en el dominio de la frecuencia usado una transformación discreta de Fourier (DFT, Discrete Fourier Transform); a continuación, en el dominio de la frecuencia, se asignan a la deseada ubicación en el ancho de banda de canal global, antes de ser convertida de nuevo al dominio del tiempo utilizado una transformada rápida de Fourier inversa (IFFT, Inverse Fast Fourier Transform) y, por último, se inserta el CP. La diferencia más obvia entre los dos esquemas es que OFDMA transmite los datos de cuatro símbolos QPSK en paralelo, uno por

subportadora, mientras que SC-FDMA transmite los datos ocupando  $M \times 15\text{KHz}$  de ancho de banda. Esto se muestra en la Figura 2.4.4

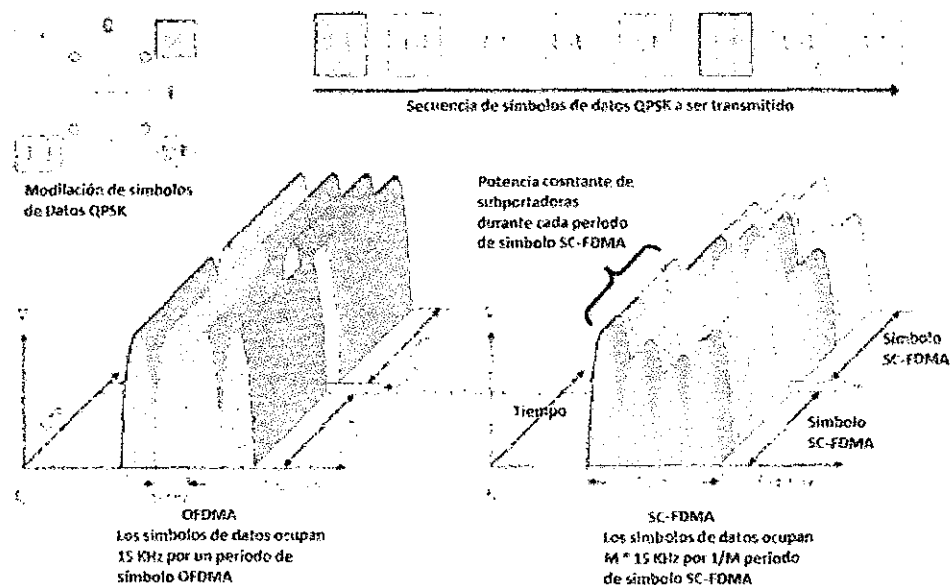


Figura 10: Diagrama de funcionamiento de OFDMA y SC-FDMA [12]

DFT-S-OFDM (Discrete Fourier Transform-Spread-OFDM) es la tecnología de modulación de multiplexación utilizada en el enlace ascendente de LTE, que es similar a OFDM pero que elimina las limitaciones causadas por una PAPR alta. A cada usuario se le asigna parte del ancho de banda del sistema. Por su parte, SC-FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access) es la tecnología de acceso múltiple relacionada con DFT-S-OFDM, por lo que se puede hacer referencia tanto a uno como a otro termino para referirse a lo mismo, siendo en cierto modo equivalentes. [7]

## 2.5. Banda Ancha

Banda ancha puede considerarse, desde un punto de vista técnico, como un conjunto de tecnologías de red avanzadas o como el motor de una radical y gran transformación que revitaliza la entrega de los servicios existentes y da pie a la aparición de nuevos e innovadores servicios. En el mundo moderno, la banda ancha se ha convertido en una infraestructura fundamental que determina la competitividad nacional de los países en la economía digital mundial. La banda ancha es también una herramienta para

alcanzar nuestra meta común, las sociedades del conocimiento, donde el acceso a la información y la creatividad humana son vitales.

En términos técnicos, la “banda ancha” puede definirse por lo siguiente:

- Velocidades de transmisión mínimas (aunque existen diversas definiciones).
- Tipo de tecnología (por ejemplo, IMT-Avanzadas móviles o las llamadas tecnologías “4G”).

Una serie de conceptos funcionales, entre los que se cuentan:

Conexión permanente: donde el servicio Internet está sujeto a actualizaciones instantáneas en tiempo real.

Alta capacidad: conexiones de baja latencia y alta capacidad que pueden transportar grandes cantidades de bits (información) por segundo (en lugar de la velocidad a la que viajan esos bits).

Sea cual sea el punto de vista y la definición, la banda ancha es capaz de entregar de manera fiable servicios convergentes y de ofrecer simultánea y conjuntamente voz, datos y vídeo, posiblemente a través de redes diferentes.

La conectividad en banda ancha sustenta una serie de diversos servicios, informaciones y aplicaciones desde la realidad aumentada para particulares a las pruebas médicas y el diagnóstico a distancia, la computación distribuida en la investigación académica y la interactividad en línea a distancia en la educación y muchas más aplicaciones más. En el futuro, la entrega de servicios sanitarios, educativos, bancarios, empresariales, comerciales y estatales dependerá enteramente de las plataformas de banda ancha, por lo que todos y cada uno de los países ha de planificar el “futuro basado en la banda ancha”.

Se está construyendo un mundo en red, basado en las redes de la próxima generación (NGN), pero que engloba los conceptos de inteligencia ambiente integrada, tráfico automatizado máquina a máquina (M2M) e “Internet de cosas” (IoT). En el futuro mundo en red, los usuarios disfrutarán de

conectividad de alta velocidad móvil, en cualquier momento y utilizando cualquier dispositivo.

Al tiempo que da pie a nuevos servicios e industrias, la banda ancha está transformando las industrias existentes y los marcos reglamentarios heredados a una velocidad de vértigo:

- ✓ Los periódicos se han transformado en proveedores de contenido en línea.
- ✓ La voz por el protocolo Internet (VoIP) ha revolucionado el mercado de las comunicaciones vocales.
- ✓ La industria musical está innovando sus modelos de ingresos.

La protección de la propiedad intelectual en línea se enfrenta a nuevos retos. Y el potencial revolucionario de la banda ancha no se queda ahí. Hoy en día un único software o dispositivo innovador puede:

Crear un nuevo mercado (por ejemplo, como eBay creó un mercado mundial de subastas en línea). Invadir un mercado en línea existente (por ejemplo, libros electrónicos y tiendas de música en línea).

Combinar mercados existentes en un mercado convergente de la era digital (por ejemplo, los teléfonos inteligentes (smartphones) han conseguido combinar el teléfono móvil con una cámara digital, un reproductor de música y acceso a Internet en línea para información y ocio).

Prácticamente todos los países del mundo disponen de banda ancha. Las antiguas preocupaciones acerca de la “brecha digital” o la desigual distribución de acceso a Internet o equipos en los diversos países han evolucionado y hoy en día el problema es evitar la creación de brechas digitales en términos de velocidad o calidad de acceso, no sólo en los países en desarrollo, sino en el mundo entero. Dado que la banda ancha será el principal mecanismo de entrega de una amplia gama de servicios esenciales, grupos multipartidos como la Comisión de la Banda Ancha para el Desarrollo Digital de las Naciones Unidas están fomentando activamente que todos los países den en sus Planes nacionales de banda ancha prioridad al desarrollo de

redes fijas y móviles de alta velocidad a fin de cimentar sus previsiones de crecimiento económico a largo plazo y de competitividad en la era de la información. Los últimos estudios sugieren que las TIC y la Internet de banda ancha han crecido más rápido cuando los mercados se han abierto a la competencia.

Se cuentan hoy en día 2 600 millones de usuarios de Internet y 1 200 millones de abonos a la banda ancha móvil en todo el mundo , y prácticamente las tres cuartas partes de la población mundial dispone ya de un teléfono móvil. En 2011, el número de dispositivos conectados superó por primera vez a la población mundial. En 2020, el número de dispositivos conectados podría llegar a ser de seis por persona, transformando así nuestro concepto de Internet, y de la sociedad, para siempre.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, el Foro Mundial de Política de las Telecomunicaciones/TIC (FMPT) de 2013 presenta su proyecto de opinión Fomentar el entorno propicio para un mayor crecimiento y desarrollo de la conectividad de banda ancha. [13]

## **2.6. Asignación de Frecuencias**

LTE ofrece gran flexibilidad a los operadores para determinar el espectro en el cual desplegar sus redes, ya que puede operar en múltiples bandas de frecuencias incluyendo las de 2G y 3G, que ya han sido ampliamente liberadas alrededor del mundo (Esto significa que muchos operadores podrán desplegar LTE en bandas de frecuencias bajas con mejores características de propagación). Mientras que WCDMA/HSPA usan canales fijos de 5 MHz , la cantidad de ancho de banda para LTE puede ser escalada desde 1,25 MHz hasta 20 MHz , lo que significa que una red LTE puede ser lanzada con una cantidad de espectro pequeña sobre los servicios actuales , y agregar más espectro conforme los usuarios cambien a la nueva tecnología . Esto también permite a los operadores formular diferentes estrategias para aprovechar los recursos de espectro que tienen disponibles.

El 3GPP ha identificado varias bandas de espectro pareadas (para operación FDD), que se muestran en la tabla 3, lo que significa que un operador puede

introducirlo en nuevas bandas de espectro que hasta ahora no estaban disponibles.

Hay un gran número de asignaciones de espectro de radio que han sido reservadas para FDD, dúplex por división de frecuencia, para el uso de LTE. Las bandas de frecuencias FDD se emparejan para permitir la transmisión simultánea en dos frecuencias y, también tienen una separación suficiente que las señales transmitidas no afecten indebidamente el comportamiento del receptor, ya que, si estuviesen demasiado cercanas, podría bloquearse si los filtros separados no actuasen bien.

Tabla N° 3: Bandas de frecuencias asignadas a LTE-FDD [14]

NUMERO DE LA BANDA (Uso FDD)	DESCRIPCIÓN/ NOMBRE	UPLINK (MHz)	Downlink (MHz)
1	Núcleo IMT	1.920-1.980	2.110-2.170
2	PCS 1900	1.850-1.910	1.930-1.990
3	GSM 1800	1.710-1.785	1.805-1.880
4	AWS (EE.UU.)	1.710-1.755	2.110-2.155
5	850 (EE.UU.)	824-849	869-894
6	850 (JAPON)	830-840	875-885
7	Extensión IMT	2.500-2.570	2.620-2.690
8	GSM 900	880-915	925-960
9	1700 (Japón)	1.750-1.785	1.845-1.880
10	3G Américas	1.710-1.770	2.110-2.170
11	UMTS 1500	1.428-1.453	1.476-1.501
12	US 700	698-716	728-746
13		776-788	746-758
14		788-798	758-768
15		704-716	734-746

Con el interés despertado en algunos mercados por LTE TDD, hay varias asignaciones de frecuencias que se están preparando para utilizarlo. Éstas son impares porque el enlace ascendente (Uplink) y el descendente (Downlink) comparten la misma frecuencia, con multiplexación en el tiempo.



Tabla 4: Bandas de frecuencias asignadas a LTE – TDD [14]

Designación de la banda (TDD)	Nombre de la Banda	Asignación
a	TDD 1900	1.900-1.920
b	TDD 2000	2.010-2.025
c	PCS gap Central	1.910-1.930
d	Extensión IMT	2.570-2.620
e	TDD China	1.880-1.920
f	2.3 TDD	2.300-2.400

Además de estas bandas, hay otras en estudio por el 3GPP, como son la del dividiendo digital (790-862 MHz), en 3,5 GHz (3.400-3.600) y la de 3,7 GHz (3.600-3.800), que posiblemente, se asignen en cuanto sea posible.

Acabamos de ver que LTE da soporte tanto a operación FDD como TDD, lo que ofrece a los operadores la flexibilidad de ajustar sus redes, espectro y objetivos de negocios existentes para servicios de banda ancha móvil y multimedia.

Desde que se crearon con UMTS los modos FDD (División en frecuencias) y TDD (División en tiempo), parece natural que LTE, como evolución de la 3G, siga su ejemplo. Así, mientras que Vodafone, Versión y otros grandes operadores apuestan por LTE FDD, que utilizan varias zonas del espectro de radio (Bandas ascendentes y descendentes), otros impulsan el desarrollo de LTE TDD, que es una migración natural para los operadores TD-SCDMA, también puede resultar una excelente solución para utilizar las grandes franjas de espectro TDD fragmentado y no apareado que están presentes en toda la región Américas.

En caso de llegar a un acuerdo y disponer de móviles – Chip único y redes que funcionen con estas dos especificaciones, ello sería un enorme paso para la industria 4G a nivel mundial, pues se conseguirían economías de escala muy importantes, para conseguir abaratar los productos. [7]

## 2.7. Red de Acceso y Transporte

En el PERÚ MTC

- ✓ Transporte: Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica.
- ✓ Acceso: Red 4G-LTE para prestar servicios de banda ancha móvil.

### 2.7.1 Fibra Óptica al 2013

Cobertura Limitada (71 capitales de provincia) Inicialmente despliegue sólo en la Costa.

Expansión a algunas zonas de la sierra, y pocas ciudades de la selva.

Elevados costo de los enlaces de transporte.

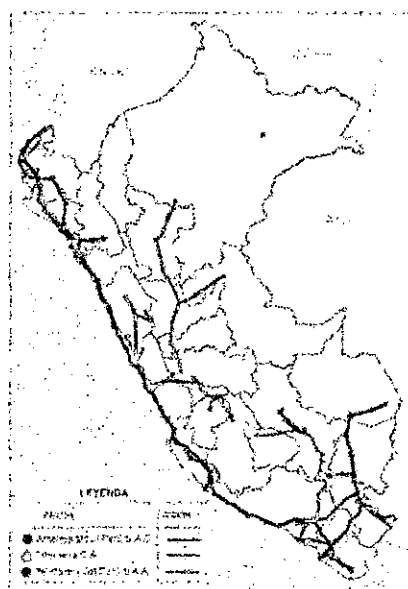


Figura 11: Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica 2013[15]

Se logra conectar al 92% de capitales de provincia (180). Más de 13,500 km de fibra óptica nuevos. Se expandirá la penetración de la RDNFO hacia capitales de distrito.

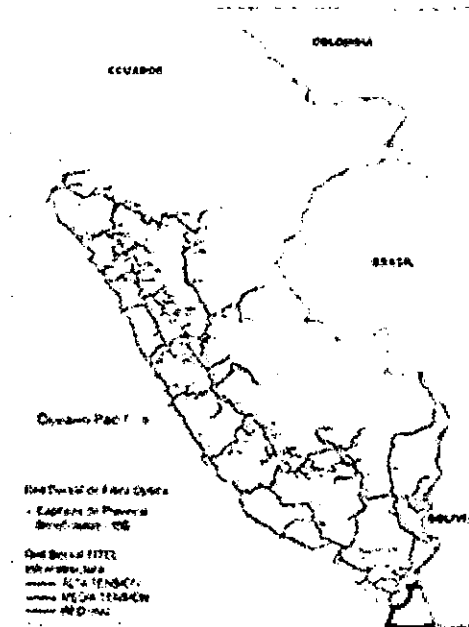


Figura 12: Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica 2016[16]

### 2.7.2. Características técnicas

- El uso de la tecnología DWDM. Se exigen velocidades de 100 Gbps en la Red Core.
- 24 hilos de fibra óptica. Que aseguran redundancia y escalabilidad hacia el futuro.
- Protocolos: MPLS, IPv4, IPv6, BGP
- Uso de las redes de alta y media tensión existentes.

Gracias a la Ley 29904, Ley de Banda Ancha.

### 2.7.3. Acceso: Red 4G-LTE

- Redes de Acceso Móviles
- Las redes de acceso móviles (inalámbricas) presentan diversas características favorables, respecto a las redes de acceso fijas.
- Permiten un despliegue mucho más rápido del servicio para los usuarios.
- Ofrecen movilidad a los usuarios.
- Requieren menos inversión.

#### **2.7.4. Banda 1.7/2.1 GHz**

- Se identificó la Banda 1.7/2.1 GHz (AWS) para el uso de la tecnología 4G-LTE.
- La tecnología 4G-LTE permite desarrollar la banda ancha móvil (smartphones, tabletas, modem-USB, etc.), a precios asequibles gracias a las economías de escala del LTE.
- En julio de 2013 se adjudicaron los Bloques A y B de la Banda 1.7/2.1 GHz.
- Cada bloque tiene 20+20 MHz. Se pagó más de USD\$ 255 millones por ambos bloques.
- Se estima que en total los adjudicatarios realizarán una inversión superior a los USD\$ 1 100 millones.[15]

#### **2.8. Tecnología LTE – [16]**

La red LTE, también llamada EPS (Evolved Packet System), es una red IP extremo a extremo (E2E).

El EPS se divide en dos partes:

El E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) que comprende la tecnología relacionada con la red de acceso radio de LTE. El EPC (Evolved Packet Core) que comprende la tecnología relacionada con la red troncal de LTE. IP E2E significa que todo el tráfico fluye mediante IP por la red EPS.

La red EPS conecta a un UE con una red de paquetes o PDN (Packet Data Network) donde está conectada la entidad o entidades que proporcionan el servicio.

## 2.9. Arquitectura de una red LTE

### 2.9.1. Modelo de referencia

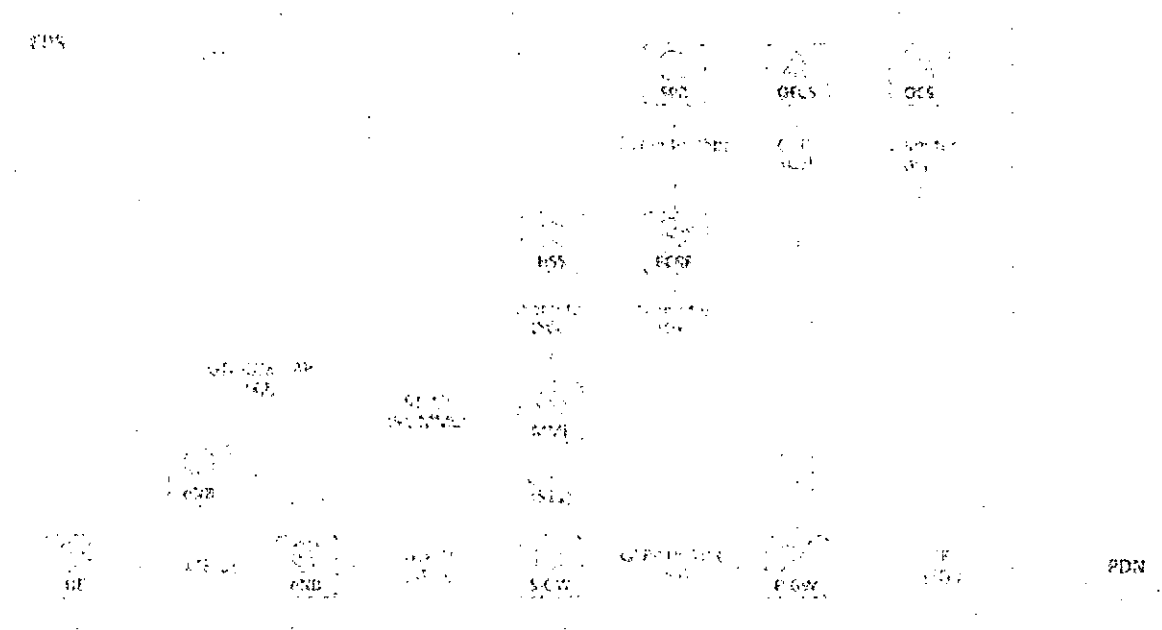


Figura 13: Modelo Red LTE

### 2.9.2. Packet Data Networks

- Una PDN (Packet Data Network) es un dominio IP interno o externo al operador, con el cual un UE quiere comunicarse.
- Las PDN proporcionan servicios a los UE.
- Por ejemplo:
- Acceso a Internet.
- Voz/video mediante el IMS (IP Multimedia Subsystem).

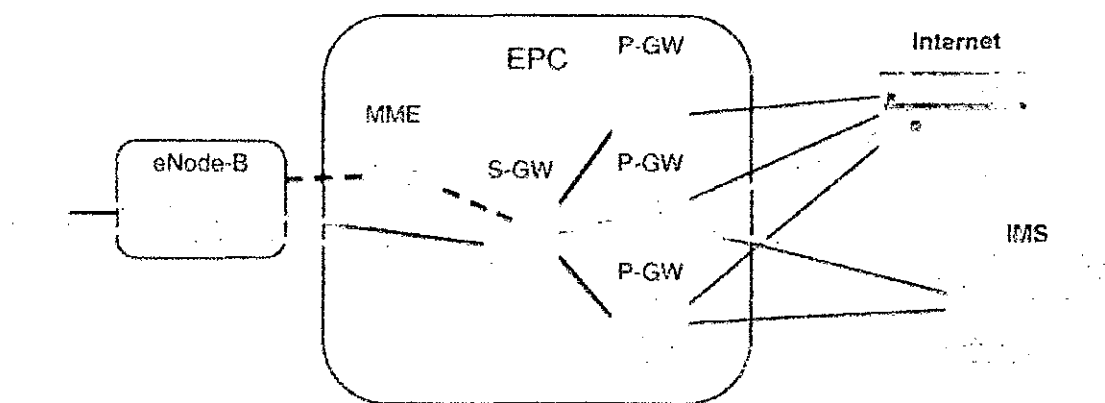


Figura 14: Red de datos por paquetes

### 2.9.3. Entidades LTE:

- El equipo de usuario o **User Equipment (UE)** es cualquier dispositivo utilizado directamente por un usuario final para comunicarse en la red LTE.
- Puede ser un teléfono de mano, un ordenador portátil equipado con un adaptador de banda ancha móvil, o cualquier otro dispositivo.
- Se conecta a una estación base o nodo eNB.
- La interfaz de radio entre el UE y el eNB se llama LTE-Uu.

El UE se comunica también con un MME (en la red EPC) mediante señalización NAS (Non-access stratum) para:

- Gestión de sesiones/identidad.
- Gestión de llamadas y movilidad.

#### 2.9.3.2. eNB

- El **eNB** proporciona a los **UEs** las interfaces radioeléctricas para la comunicación con la red.

Las tareas del eNB comprenden:

- El control de admisión radio.
- El control de la movilidad con otros eNBs.
- El control de los recursos radio (bearers radio o RB). Lleva a cabo la Gestión de Recursos Radio (RRM) implementando el "scheduling" para la asignación dinámica de recursos radio.
- La coordinación de la interferencia inter-celda (ICIC).

#### 2.9.3.3. MME

- La **Mobility Management Entity (MME)** es la principal entidad de control para la E-UTRAN.
- Se comunica con un HSS (interfaz S6a) para autenticar al usuario y obtener su perfil.

El MME gestiona:

- La sesión de los UE con la red o **ESM (EPS Session Management)**.

Gestiona con los UE la movilidad en el EPS o **EMM (EPS Mobility Management)**. Esto incluye: paging, gestión de la tracking área list y gestión de los handovers.

- Para implementar EMM, ESM y la seguridad utiliza señalización NAS (Non-access stratum).
- Para calidad de servicio (QoS) gestiona los bearers EPS.

#### 2.9.3.4. S-GW

Un **S-GW (Serving Gateway)** termina la interfaz hacia una E-UTRAN.

Sirve como punto fijo o “ancla local” para las conexiones de datos cuando se produce movilidad entre nodos eNB y entre redes 3GPP (2G y 3G).

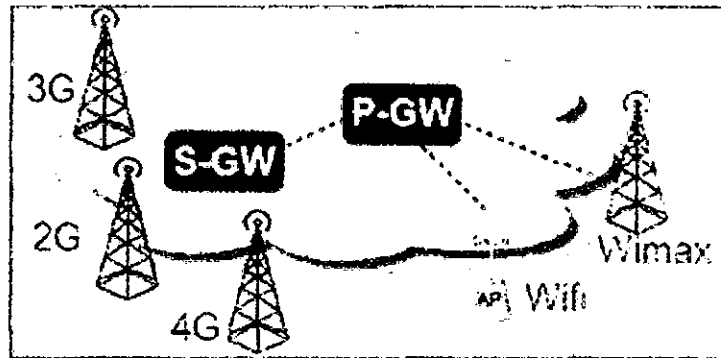


Figura 15: S-GW

#### 2.9.3.5. P-GW I

- Un **P-GW (PDN Gateway)** proporciona acceso a una PDN a un UE.
- El P-GW proporciona al UE la dirección IP.
- Sirve como punto de anclaje para los handover entre redes 3GPP y redes y no-3GPP.

#### 2.9.3.6. P-GW II

Las principales funciones soportadas por un P-GW son los siguientes:

- Enrutamiento y forwarding IP.
- Filtrado de paquetes por SDF (Service Data Flow) o por usuario.
- Asignación de direcciones IP a los UE.
- Anclaje para movilidad entre 3GPP y no-3GPP.

- Funciones PCEF (policy enforcement and charging function) para aplicar filtrado de paquetes y tarificación basada en las reglas PCC (Policy and Charging Control) que le proporciona un PCRF.

#### **2.9.3.7. HSS**

- Un **HSS (Home Subscriber Server)** es una base de datos donde se almacena principalmente la parte de autenticación de los perfiles de usuario.
- El HSS le proporciona los parámetros necesarios a los MME para que éstos puedan realizar la autenticación de usuario y controlar el acceso a las diferentes PDNs.

#### **2.9.3.8. PCRF**

- Un **PCRF (Policy and Charging Rules Function)** es una entidad encargada de la gestión de políticas y de tarificación.
- Toma decisiones por cada usuario o por **SDF (Service Data Flow)**.
- Proporciona las reglas de QoS y tarificación conocidas como **PCC (Policy Control and Charging)** al elemento **PCEF (Policy and Charging enforcement Function)**.
- En LTE el P-GW el elemento que fuerza el cumplimiento de las reglas PCC, es decir, el PCEF es el P-GW.

#### **2.9.3.9. SPR**

- Un **SPR (Subscriber Profile Repository)** es una base de datos donde se almacenan los perfiles de usuario respecto a las políticas de filtrado y QoS.
- El SPR proporciona información de suscripción (perfil de acceso por subscriptor) al PCRF.
- El PCRF mediante una serie de políticas definidas por el operador y la información recibida del SPR crea reglas PCC.
- Al ser el HSS y el SPR bases de datos con información por usuario, se pueden implementar en un solo nodo.



### 2.9.3.10. OCS & OFCS

Un OCS (Online Charging System):

- Proporciona control de crédito en tiempo real.
- También funciones de tarificación basadas en volumen, tiempo y eventos.
- Un OFCS (Offline Charging System):
- Proporciona información de tarificación offline.
- La tarificación se basa en CDRs (Charging Data Records).

### 2.9.3.11. Interfaz LTE-Uu

- En esta interfaz hay protocolos para el plano de usuario y para el plano de control con el UE.
- En esta interfaz se establecen dos tipos de canales radio:
- Canales para el envío de paquetes IP de usuario denominados **Data Radio Bearers (DRBs)**.
- Canales para señalización con la red denominados **Signalling Radio Bearers (SRBs)**.

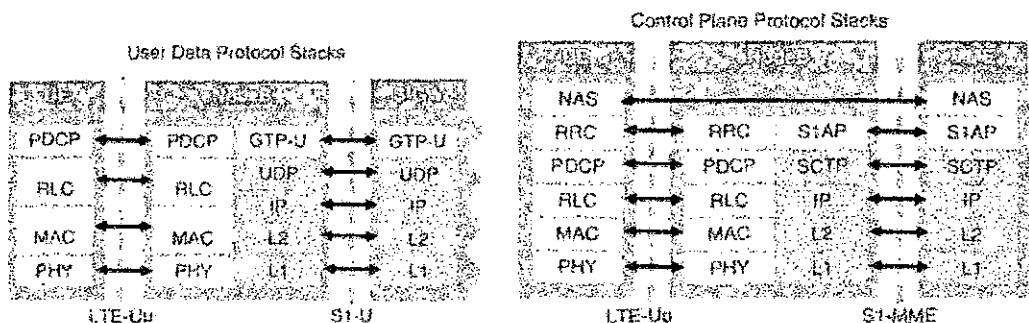


Figura 16: Interfaz LTE

### 2.9.3.12. Interfaces y Protocolos

Tabla 5: Protocolos LTE

PUNTO	PROTOCOLOS	DESCRIPCIÓN
LTE-Uu	E-UTRA	Interfaz entre un UE y un eNB. Por el LTE-Uu el usuario envía sus paquetes IP.
S1-U	GTP-U	Interfaz entre un eNB y un S-GW. Proporciona un túnel GTP-U por bearer.
S5	GTP-U	Interfaz entre un S-GW y un P-GW para el plano de usuario.
Sgi	IP	Interfaz entre el P-GW y una PDN.
X2	GTP-U	Interfaz entre eNBs. Para el plano de usuario se utiliza en los handovers entre eNBs para transferir los paquetes de usuario pendientes.

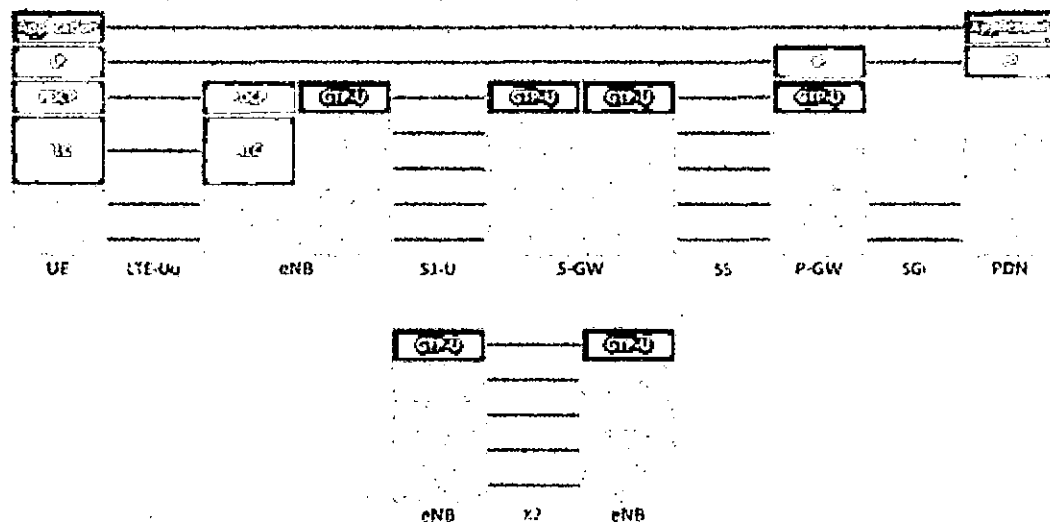


Figura 17: Plano de Usuario

### 2.9.3.13. Flujo del Tráfico I

- El tráfico de usuario fluye entre el eNB, el S-GW y P-GW.
- A través de túneles GTP-U en las interfaces S1-U y S5.
- Cada túnel tiene un identificador llamado TEID.

- El S-GW crea un mapeo uno-a-uno entre cada túnel GTP-U en el interfaz S1 y cada túnel en el interfaz S5.
- Para realizar el mapeo utiliza los TEID de cada túnel.
- Se crea un túnel por Bearer y dirección (uplink/downlink).

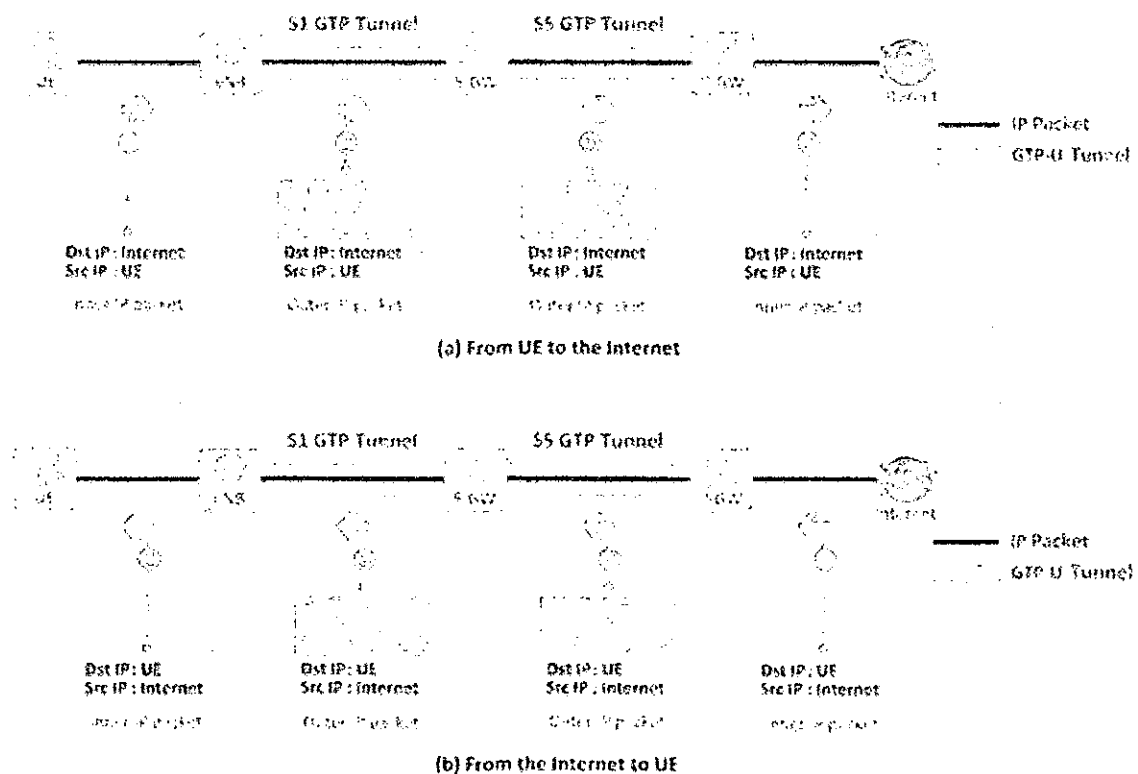


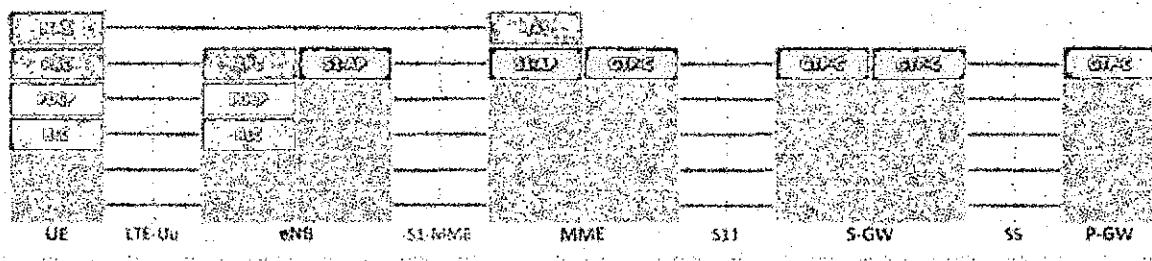
Figura 18: Tráfico de usuario

#### Tráfico uplink (UE a Internet):

- El UE envía paquetes IP de usuario a un eNB sobre la interfaz LTE-Uu.
- El eNB encapsula los paquetes IP de usuario con la cabecera GTP-U en S1.
- Reenvía los paquetes con la IP externa resultante al S-GW.
- Para la cabecera del túnel GTP-U en S1, el eNB selecciona un TEID, Dirección IP de destino (IP del S-GW), y la IP origen (IP del eNB).
- Después de recibir los paquetes IP externos, el S-GW elimina el encabezado GTP.
- El S-GW encapsula los paquetes IP del usuario (paquetes internos) con una nueva cabecera GTP para el interfaz S5.

- Tráfico downlink (desde internet a UE):**

- Un P-GW recibe paquetes IP destinados para un UE a través de Internet.
- El P-GW encapsula los paquetes IP de usuario con GTP en S5 y reenvía los paquetes IP externos resultantes al S-GW usando, TEID, IP del S-GW y su IP para hacer la cabecera del túnel.
- S-GW elimina el encabezado del túnel S5 GTP, encapsula los paquetes IP del usuario (los paquetes IP internos) con la cabecera del túnel GTP S1 y reenvía los paquetes IP externos resultantes al eNB.
- Después de recibir los paquetes IP externos, el eNB obtiene los paquetes IP del usuario eliminando la cabecera del túnel GTP S1.
- El eNB transfiere los paquetes al UE a través del enlace radio mediante un portador de datos radio o DRB (Data Radio Bearer).



- Los interfaces y protocolos de señalización (plano de control) se utilizan para gestionar la movilidad, establecer túneles GTP-U, etc.
- La señalización de alto nivel entre UE y MME se denomina **NAS (Non Access Stratum)**.

- Los niveles más bajos (RRC, PDCP, RLC, MAC y Phy) se denominan **AS (Access Stratum)**.

#### 2.9.3.15. Establecimiento de GTP-U

- Para establecer los túneles GTP-U en S1-U:
- S-GW asigna un identificador TEID para el tráfico Up Link (UL S1-TEID en la figura del flujo del tráfico en el plano de usuario). eNB asigna un TEID para el tráfico Down Link.
- Los valores TEID del túnel GTP se intercambian entre el eNB y el S-GW a través del MME mediante mensajes S1AP y GTP-C.
- Del mismo modo cuando se establece un túnel GTP en la interfaz S5:
- P-GW asigna un TEID (UL S5-TEID) para el uplink.
- S-GW asigna un TEID (DL S5-TEID) para el tráfico downlink.
- Los TEID se intercambian entre la S-GW y el P-GW usando el protocolo GTP-C.

#### 2.9.3.16. En GTP-C se utiliza un túnel para señalización por usuario Interfaz X2- I

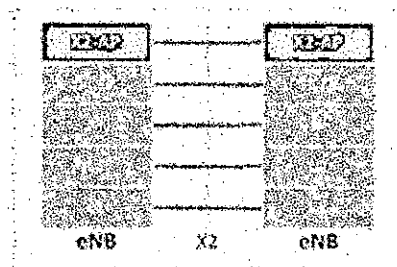


Figura 20: Interfaz X2- I

El protocolo X2-AP en el interfaz X2 se utiliza para gestionar la movilidad de los UE entre nodos eNB y también para las tareas de auto organización o SON (Self-Organizing Network).

Para la movilidad:

Gestión de handovers entre eNB.

Gestión de la transferencia de datos de usuario de un eNB a otro.

- Información de estado.
- Información de la carga de tráfico.
- Información de configuración o actualización de la configuración.
- Información para coordinar entre eNB el ajuste de parámetros de movilidad.

G1P2      G2P2

1. MME      1. MME

2. \$10      2. \$10

3. MME      3. MME

4. \$10      4. \$10

5. MME      5. MME

- Es la interfaz entre MMEs.
- Utiliza el protocolo GTP-C.
- Se utiliza para la transferencia de información de los usuarios en los handovers que no X2 (que no son entre eNBs).
- También sirve para gestionar la reubicación de MMEs.

- En las redes LTE diferentes IDs (Identificadores) son utilizados para identificar cada entidad.
- Entender los IDs y las entidades EPS es necesario para entender la tecnología LTE.

**Fecha de Creación.**

- 46

- Creada bajo demanda cuando el usuario accede a la red o utiliza el servicio.

#### Tipo

- Permanente. Fija una vez definida.
- Temporal. Cambia cada vez que se activa.

#### Rango.

Cada ID LTE es único en tanto en el mundo, en el operador de red, en las entidades o canales.

### 2.9.3.19. Identificadores LTE II

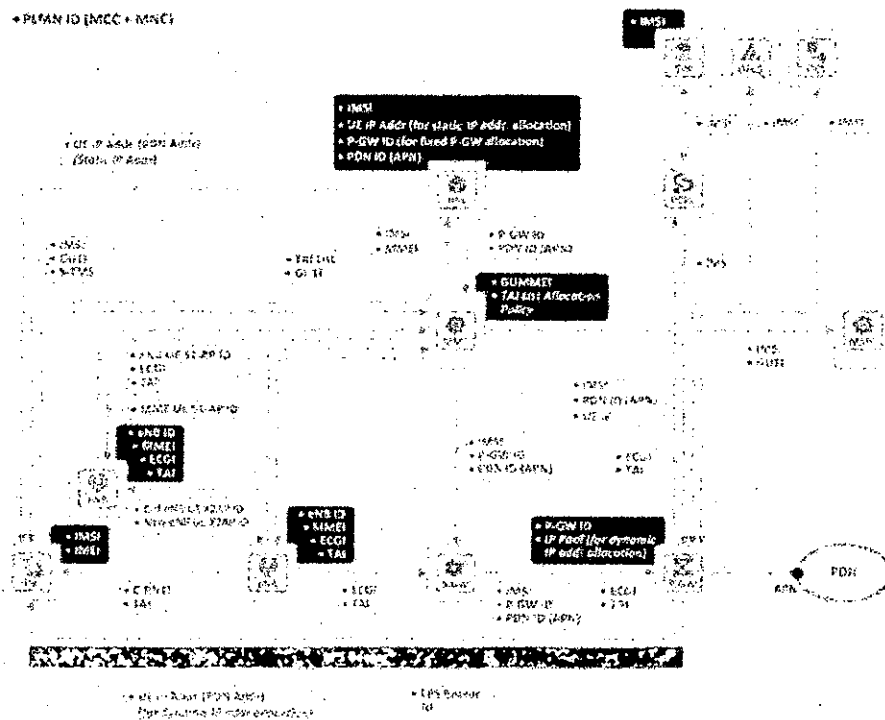


Figura 22: Identificadores LTE

### 2.9.3.20. IDs por Entidades EPS

- **UE (User Equipment):** IMSI, GUTI, S-TMSI, IP, C-RNTI, UE S1AP ID, UE X2AP ID.
- **ME (Mobile Equipment):** IMEI, IMEISV.
- **NE (Network Equipment):** GUMMEI, MMEI, Global eNBID, eNB ID, ECGI, ECI, P-GW ID.
- **Localizaciones:** TAI, TAC.
- **Sesiones/Bearers EPS:** PDN ID, EPS BearerID, E-RAB ID, DRB ID, TEID, LBI.

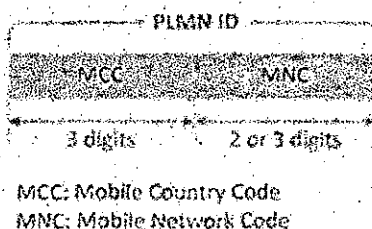
### 2.9.3.21. PLMN ID

- **PLMN** son las siglas de Public Land Mobile Network, es decir, una red pública móvil gestionada por un operador de red.
- El **PLMN ID** identifica a un operador de una red globalmente (identifica al operador de red de forma única en todo el mundo).

El PLMN ID está compuesto de:

- **MCC (Mobile Country Code)** identifica al país donde la red esta localizada.
- **MNC (Mobile Network Code)** identifica al operador de la red y es asignado en cada país.

#### • PLMN ID Format



#### • Example: South Korea - KR

MCC	MNC	Brand Name	Mobile Network Operator
450	02	KT	KT
450	04	KT	KT
450	05	SKT	SK Telecom
450	06	LG U+	LG Telecom
450	08	O!leh	KT

Figura 23: Formato PLMN ID



- En el ejemplo anterior vemos que para Corea del Sur hay 3 operadores de red diferentes: KT, SK Telecom y LG Telecom.
- KT administra 3 redes diferentes: 02, 04 y 08.

#### 2.9.3.22. IMSI

- El **IMSI** (International Mobile Subscriber Identity) identifica de forma global a un suscriptor móvil.
- Cuando un usuario compra un **USIM** (UMTS Subscriber Identity Module), el chip contiene el **IMSI**.
- El IMSI está compuesto del **PLMN ID** + **MSIN** (Mobile Subscriber Identification Number) asignado por el operador.

#### 2.9.3.23. El MSIN:

- Tiene un tamaño máximo de 10 dígitos.
- Identifica a un suscriptor móvil dentro de una PLMN.
- El IMSI es un valor
- Permanente en el USIM, HSS y SPR.
- Temporal para MME, S-GW, P-GW y PCRF.

#### 2.9.3.24. Dirección IP

- También llamada **dirección PDN**.
- Es asignada por la red LTE al UE.
- Dado que un UE puede conectarse a varios PDN a la vez, la red LTE debe asignar una dirección IP para cada PDN.
- La asignación de IP puede ser:
- **Dinámica**. Cuando el UE se conecta a la red el operador de red asigna una IP de su rango de direcciones disponibles, por tanto la dirección puede ser distinta en diferentes attach.

- **Estática.** El operador asigna una IP en el momento de la suscripción y cada vez que el UE se conecta a la red, siempre le es asignada la misma IP.

#### 2.9.3.25. Mobile Equipment (ME)

- Un UE está compuesto de un **ME** (Mobile Equipment) y un **USIM** (UMTS Subscriber Identity Module).

Un ME puede estar compuesto de un **TE** (Terminal Equipment) y un **MT** (Mobile Terminal):

- El MT es donde se ejecutan los protocolos de acceso radio.
- El TE es donde se ejecutan las funciones de control del MT.
- El MT y TE están normalmente integradas en un móvil y separadas en una computadora.

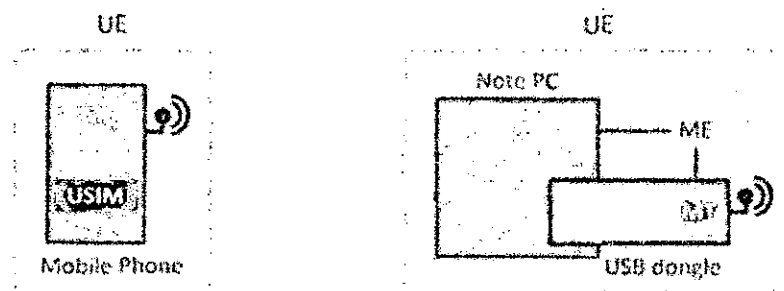


Figura 24: Móvil Equipamiento

#### 2.9.3.26. IMEI & IMEI/SV

El **IMEI** (International Mobile Equipment Identity) es un identificador único asignado a cada **ME**:

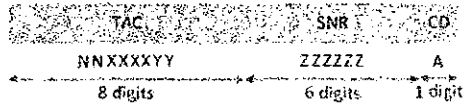
- El IMEI se asigna a cada ME en el momento de su fabricación.
- El IMEI contiene información del fabricante, el modelo y el número de serie.
- Hay dos versiones, el IMEI y el IMEI/SV.
- El IMEI/SV incluye la versión software del equipo.

- Los operadores mantienen una base de datos con todos los IMEI. De esta forma, pueden denegar el acceso a la red a IMEI reportados como perdidos o robados.

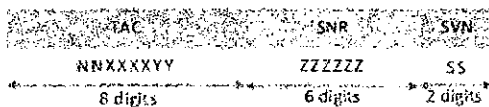
### 2.9.3.27. IMEI & IMEI/SV

#### • IMEI, IMEI/SV Format

- IMEI:



- IMEI/SV:



Format	Description (4)
TAC*	NN Reporting Body ID
	XXXXYY ME Type ID defined by Reporting Body
SNR	ZZZZZZ Serial No. Allocated by Reporting Body but assigned per ME by the manufacturer
CD	A Check Digit, defined as a function of all other IMEI digits
SVN	SS Software Version Number, 00 - 99 is reserved for future use.

\* TAC: Type Allocation Code

Figura 25: Formato IMEI

- El **IMEI** está compuesto del **TAC** (Type Allocation Code), **SNR** (Serial Number) y el **CD** (Check Digit).
- El **IMEI/SV** está compuesto del **TAC** (Type Allocation Code), **SNR** (Serial Number) y el **SVN** (Software Version Number).
- El **TAC** está compuesto del **RBID** (Reporting Body Identifier) y del **ME Type ID** que representa el nombre del fabricante y el modelo.
- Los números de serie son asignados por el fabricante.

En el siguiente ejemplo podemos ver la composición del IMEI 3566432053951377.

La composición del TAC nos muestra la información del modelo y fabricante.

- Example

TAC	RBID	35	BABT**
	ME Type ID	643205	Samsung SHV-E330S
SNR	395137		
CD	7		

\* \* BABT: British Approvals Board for Telecommunications

Device Information	
Brand	Samsung
Model	SHV-E330S
Manufacturer	Samsung Korea
Device type	Phone
Additional info	E330S Galaxy S4 LTE-A

### Figura 26: Composición de IMEI

### 2.9.3.28. MME

- El **MME** es un dispositivo que se localiza entre la **E-UTRAN** y la **EPC**.
- Se encarga del control de conexiones de UEs a la red LTE (es el cerebro de la red LTE).
- Se encarga también de la **gestión de bearers**.
- Intercambia mensajes de control con el **HSS**, con el **S-GW** y con el **eNB**.
- Los operadores de red agrupan los **MMEs** para facilitar su operación.

### 2.9.3.29. Identificadores de MME

- **MMEGI** (MME Group Identifier). Identificador que representa a un grupo de MMEs.
- **MMEC** (MME Code). Identificador que representa a un MME específico dentro del grupo de MMEs.
- **MMEI** (MME Identifier). Se utiliza para identificar un MME en la red de un operador. Está compuesto de un MMEGI y un MMEC.
- **GUMMEI** (Globally Unique MME Identifier). Combinación de PLMN ID y MMEI, para identificar globalmente el MME.

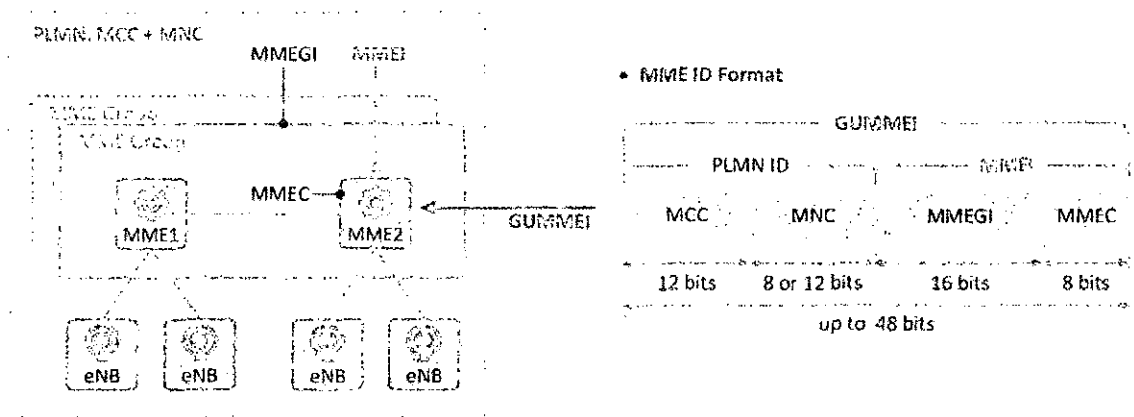


Figura 27: Identificadores MME

## 2.10. EnodoB

### 2.10.1. Identificadores eNB

Identificadores de Enb:

- **Enb ID** se utiliza para identificar un Enb dentro de la red del operador.
- **Global Enb ID** identifica a un Enb globalmente (PLMN ID+Enb ID).
- **Cell ID** identifica una celda dentro de un Enb.
- **ECI (E-UTRAN Cell ID)** identifica una celda dentro una E-UTRAN (red de un operador).
- **ECGI (E-UTRAN Cell Global Identifier)** identifica una celda globalmente.
- Los identificadores **Enb Ids** y **Cell Ids** son asignados por el operador cuando se instala el Enb.

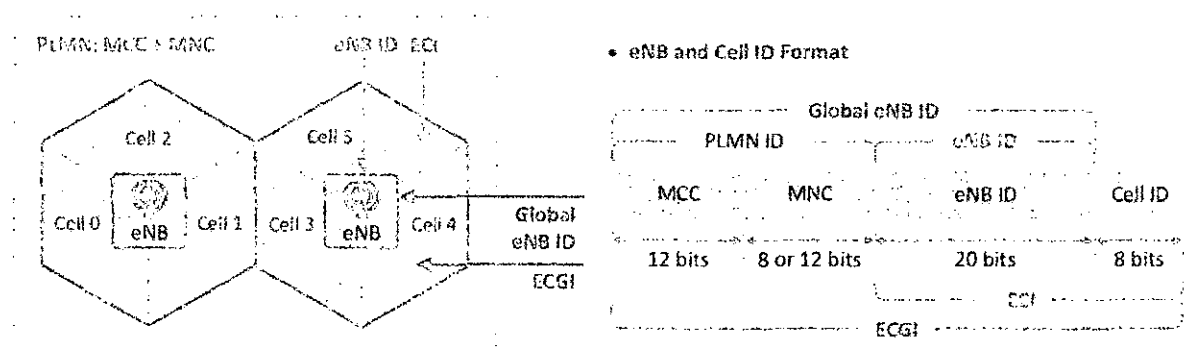


Figura 28: Identificadores del eNB

Una vez instalado el eNB envía al MME su Global eNB ID, las Tracking Areas (TAs) soportadas y los Closed Subscriber Groups (CSGs) soportados.

#### 2.10.1.1. Tracking Area (TA):

- Mientras un UE está en estado activo su ubicación es conocida por la red LTE a nivel de celda.
- Sin embargo, mientras un UE está en estado de reposo (es decir, mientras no se comunica) su ubicación es conocida por la red LTE a nivel de TA (el UE no tiene que notificar cambios de celda).
- Si hay tráfico para un UE inactivo, la red LTE tiene que despertar al UE.
- Este proceso se llama "paging" y realiza en la TA.
- Un TA se puede configurar incluyendo celdas o eNBs.

#### 2.10.1.2. Closed Subscriber Group (CSG):

Un CSG es un grupo de celdas accesibles sólo a un cierto grupo de suscriptores. El MME responde enviando su GUMMEI al Enb.

#### 2.10.1.3. P-GW ID

El identificador de un P-GW (**P-GW ID**) puede ser:

- Una dirección IP.
- Un nombre **FQDN** (Full Qualified Domain Name).
- El MME es el que asigna un P-GW para la conexión de un UE a una PDN.

La provisión del P-GW puede realizarse de dos formas:

- **Fija.** El operador de red provee el P-GW ID dentro de los perfiles de suscripción en el HSS y el HSS informa al MME del **P-GW ID** al que debe conectarse.
- **Dinámica.** El MME selecciona un P-GW utilizando las reglas de derivación de nombre definidas por el operador de red. El MME obtiene la lista de P-GW a través de una consulta DNS y selecciona uno.

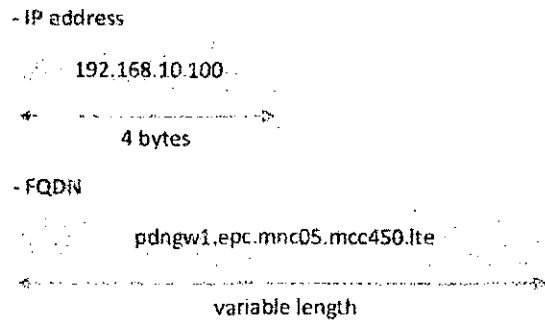


Figura 29: P-GW ID

#### 2.10.1.4. Ejemplo Provisión Fija P-GW

- UE accede a la red LTE.
- El MME solicita al HSS información del perfil de usuario del UE.

El HSS informa al MME que el UE se puede conectar a dos PDN:

PDN 1 (Internet) y PDN 2 (IMS).

El P-GW 1 es el que aparece en el perfil para conectarse a la PDN 1, y el P-GW 3 para conectarse a la PDN 2.

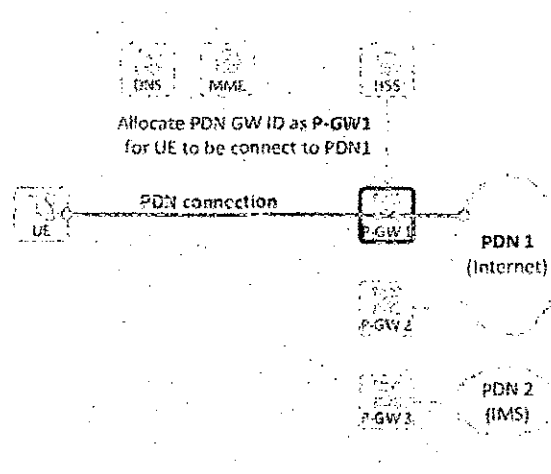


Figura 30: Provisión Fija P-GW

### 2.10.1.5. Identificadores de Localización

- El MME necesita tener información actualizada de la localización de cada UE ya que está encargado de la gestión de la movilidad.
- La red LTE conoce la localización del UE a nivel de celda (UE activo) o a nivel TA (UE inactivo).
- El Cell ID se utiliza para identificar la celda dentro de un eNB.
- El TAC (Tracking Area Code) se utiliza para identificar el TA en la red del operador.
- El identificador TAI (Tracking Area Identifier) se utiliza para identificar el TA de forma única globalmente ( $\text{TAI} = \text{PLMN ID} + \text{TAC}$ ).

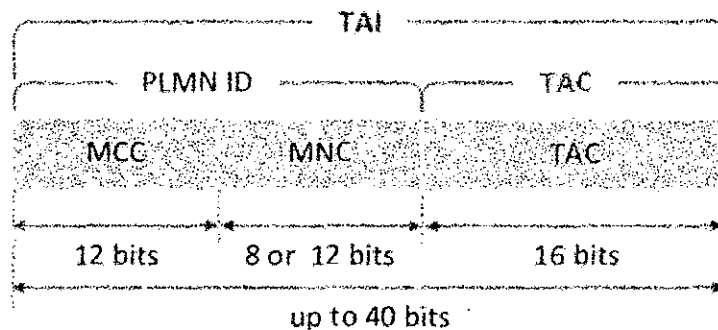


Figura 31: Identificadores de Localización

### 2.10.1.6. Asignación de TAI

Una vez el UE se conecta a una red LTE, el MME le asigna un TAI y a partir de entonces, mantiene trazabilidad de su ubicación:

- 1.- El UE informa al MME de su nueva ubicación y solicita una actualización del TA en el caso que deje el TA donde está registrado.
- 2.- El MME mantiene la información del TA en el que está ubicado el UE y actualiza su listado de TAI.
- 3.- En el caso que un UE se mueve a un TA dentro de la lista de sus TAI, no será necesario que solicite una actualización de TA.
- 4.- En el caso que el periodo de renovación de su actual TA expire, se deberá informar al MME de su actual ubicación.



Cuando el MME recibe información destinada a un UE, necesita saber su localización para remitir los datos correctamente:

- Cuando el UE está activo, el MME conoce la localización exacta (celda).
- Cuando el UE está inactivo, el MME no sabe en qué celda estará localizado.
- En el caso que el UE esté inactivo, el MME envía un mensaje de **Pagging**:
- El mensaje de pagging informa que hay datos disponibles para un cierto UE.
- Se envía a todos los eNBs que pertenezcan a la TA donde el UE reportó que estaba.
- Los UE en estado inactivo se activan cada cierto tiempo para chequear los mensajes de Pagging.
- Si el UE descubre que existe un mensaje de Pagging para él, responde para recibir los datos.

#### **2.10.1.7. Ejemplo Asignación TAI**

- eNB1 está en TA1.
- eNB2 está en TA2.
- eNB3 y eNB4 están en TA3.
- UE1 está registrado en MME1 y tiene asignada una lista TAI: {TAI1, TAI2}.
- UE2 está registrado en MME2 y tiene asignada una lista TAI: {TAI2, TAI3}.

UE1 accede a eNB1, se vuelve inactivo y en ese estado se mueve siguiendo el camino: eNB1 → eNB2 → eNB3.

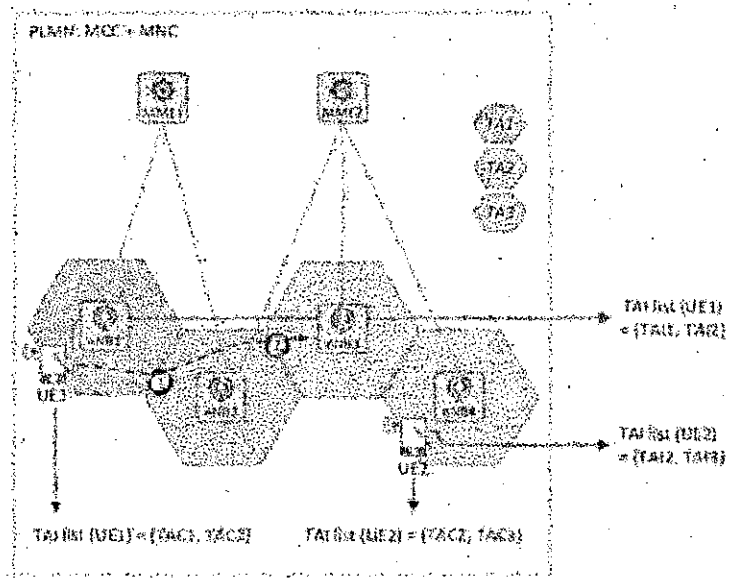


Figura 32: Ejemplo Asignación

## **CAPITULO III**

### **3. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION**

#### **3.1. INGENIERIA DE PROYECTO**

A continuación se procederá a realizar el estudio de ingeniería, evaluando los diversos métodos y modelos de propagación existentes los cuales quedan determinados en el presupuesto del enlace, dichos modelos han sido plasmados usando herramientas como Excel donde las formulas del modelo utilizado han sido consideradas.

El estudio está orientado a trabajar en la banda 1700Mhz – 2100Mhz, ya que esta banda está asignada para la tecnología LTE en nuestro País, utilizando la frecuencia 1700Mhz - 2100Mhz para el downlink y uplink respectivamente.

Primeramente se estudian los diferentes modelos de propagación de acuerdo con las zonas dicho modelo de propagación se plasma en el Link Budget, seguidamente se procederá con el análisis de la capacidad del sistema en función a los tipos de servicios que se pueden ofrecer y por último se calcula la cantidad de estaciones base necesaria para dar cobertura LTE en los distritos de Piura y Castilla.

#### **3.2 FUNDAMENTACIÓN**

##### **3.2.1 Modelos de propagación**

Mediante los modelos de propagación se puede determinar la pérdida del enlace entre una estación móvil con un equipo de usuario (UE), para ello se cuenta con diversos modelos de acuerdo a la zona, si es urbana, rural, etc. Considerando los diversos factores ambientales que puedan intervenir, para nuestro estudio se ha considerado los siguientes modelos de propagación:

- Propagación en el Espacio Libre (*Free Space*).
- Propagación de Okumura-Hata.
- Propagación COST231 Walfisch-Ikegami.

Estos modelos son de gran ayuda para determinar el comportamiento de la red en varios medios de propagación.

### 3.2.2. Propagación en el Espacio Libre (*Free Space*).

Cuando se trata de un enlace punto a punto, es preferible calcular la atenuación en el espacio libre entre antenas isótropas, denominada también pérdida básica de transmisión en el espacio libre (símbolos:  $L_{bf}$ ) de la siguiente manera: [16]

$$L_{bf} = 20 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) \text{ dB} \quad \text{ec.1}$$

$L_{bf}$  : Perdidas en el Espacio Libre

$d$  : Distancia

$\lambda$  : Longitud de onda

La ecuación 1 también se puede expresar como la ecuación 2

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log(d \text{ Km}) + 20 \log(f \text{ Mhz}) \quad \text{Ec. 2}$$

El diseño de esta investigación está orientado a trabajar en la Banda de 1700Mhz y 2100MHz, y por ejemplo con una distancia de 1Km, reemplazando estos valores en la ecuación 2, se obtiene los siguientes resultados en la Tabla 6:

Aplicando la ec. 2, frecuencia = 1700Mhz.

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log(1 \text{ Km}) + 20 \log(1700 \text{ Mhz})$$

$$L_{bf} = 32,4 + 0 + 64.61$$

$$L_{bf} = 97.01$$

Para la frecuencia: 2100Mhz.

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log(1 \text{ Km}) + 20 \log(2100 \text{ Mhz})$$

$$L_{bf} = 32,4 + 0 + 66.44$$

$$L_{bf} = 98.84$$

Tabla 6: Pérdidas en el Espacio Libre

Frecuencia(Km)	Distancia(Km)	Pérdidas en el espacio libre
1700	1	97.01
2100	1	98.84

### 3.2.3. Propagación Okumura-Hata

Es uno de los modelos más utilizados para la predicción de la pérdida de propagación en áreas urbanas. El principal resultado del trabajo de Okumura fue un conjunto de curvas que proporcionan el nivel de atenuación media relativa al espacio libre, en función de la frecuencia, la distancia entre transmisor y receptor, la altura de las antenas de la estación base y la estación móvil, además de varios factores de corrección específicos para diferentes tipos de trayecto. Este modelo está considerado entre los más simples y mejores en términos de su precisión en el cálculo de las pérdidas en el trayecto y se ha convertido en la planificación de sistemas móviles en Japón.

El modelo de Okumura es utilizado para predecir la potencia en un receptor ubicado en un área urbana para comunicaciones móviles. Este modelo es aplicable para el rango de frecuencias entre 150 a 1920 MHz es decir comprende la banda de VHF Y UHF. Según este modelo, la distancia máxima de separación que puede existir entre el transmisor y el receptor es de hasta 100 km. Puede ser usado para alturas de la antena de la estación base en el rango de 30 m a 1000 m. Las pérdidas existentes en el enlace pueden ser obtenidas mediante la ecuación. [17]

El modelo de Okumura-Hata se basa en la siguiente ecuación:

$$L_b = 69,55 + 26,16 * \log(f) - 13,82 * \log(hb) - a(hm) + (44,9$$

$$- 6,55 * \log (hb)) \log (dm) \quad \text{ec. 3}$$

$L_b$  : Pérdidas de propagación.

$f$  : Frecuencia de la portadora en MHz.

$hb$  : Altura de la antena transmisora en metros, válido para  $30 \text{ m} < hb < 200 \text{ m}$

$dm$ : Distancia entre la estación base y terminal móvil expresada en Km (1 a 20)

$hm$  : Altura de la antena receptora en metros, válido para  $1 \text{ m} < hm < 10 \text{ m}$

$a(hm)$ : Factor de corrección para la altura efectiva de la antena móvil, Factor de corrección depende de la altura del terminal móvil, se determina para ciudades pequeñas en áreas urbanas tomando en cuenta los siguientes parámetros:

$$a(hm) = (1,11 * \log f - 0,7) hm - (1,56 * \log f - 0,8)$$

$$1 \leq hm \leq 10 \text{ m}$$

De acuerdo a la investigación consideramos la ecuación 4 por considerar ciudad grande.

$$a(hm) = 3,2 * (\log 11,75 * hm)^2 - 4,97 \quad f \geq 200 \text{ Mhz} \quad \text{ec. 4}$$

Rango de variables para el modelo de Okumura-Hata:

$$150 \text{ MHz} < f < 1500 \text{ MHz}$$

$$30 \text{ m} < ht < 200 \text{ m}$$

$$1\text{ m} < h_r < 10\text{ m}$$

$$1\text{ m} < d < 20\text{ Km}$$

Para frecuencia = 1700Mhz:

$$\begin{aligned} L_b &= 69,55 + 26,16 * \log(1700) - 13,82 * \log(40) \\ &\quad - (1,11 * \log(1700) - 0,7)1,5 + (1,56 * \log(1700) - 0,8) \\ &\quad + (44,9 - 6,55 * \log(40)) \log(1,5) \end{aligned}$$

$$L_b = 69,55 + 84,51 - 22,14 - 4,32 + 4,24$$

$$L_b = 131,84$$

Para frecuencia 2100Mhz:

$$\begin{aligned} L_b &= 69,55 + 26,16 * \log(2100) - 13,82 * \log(40) \\ &\quad - (1,11 * \log(2100) - 0,7)1,5 + (1,56 * \log(2100) - 0,8) \\ &\quad + (44,9 - 6,55 * \log(40)) \log(1,5) \end{aligned}$$

$$L_b = 69,55 + 86,90 - 22,14 - 4,48 + 4,38$$

$$L_b = 134,21$$

Tabla 7: Método Okumura - Hata , Frecuencia 1700Mhz - 2100Mhz

Frecuencia(Km)	Distancia(Km)	Perdidas en el espacio libre
1700	1	131,84
2100	1	134,21

### 3.2.4. PROPAGACIÓN COST 231 WALFISCH-IKEGAMI

Es resultado de la combinación de los modelos de Ikegami y Walfisch-Bertoni. La expresión que describe al Walfisch Ikegami está compuesta por tres términos, las pérdidas por espacio libre, las pérdidas por difracción y dispersión desde las azoteas hasta nivel de la calle y las pérdidas por difracciones en múltiples pantallas. Este modelo toma en cuenta factores que obvian la mayoría de los modelos empíricos como son el ángulo de incidencia del rayo directo respecto a la calle y los factores de corrección para las pérdidas por difracción. Las pérdidas totales de este modelo se hallan según la expresión: [18]

$$L_b = L_{bf} + L_{rts} + L_{msd} \quad \text{ec. 5}$$

Respecto a modelos precedentes como Okumura-Hata, el modelo COST 231 incluye una serie de parámetros adicionales al proceso de cálculo, además de ampliar el rango de frecuencias en el cual puede usarse (800 - 2000 MHz). El modelo realiza un cálculo más detallado de la atenuación, basándose en cuatro parámetros adicionales:

- altura de los edificios
- ancho de las calles
- separación entre edificios
- orientación de la calle respecto a la dirección de propagación.

La pérdida básica de propagación,  $L_b$ , es calculada como la suma de tres componentes: la pérdida de propagación en condiciones de espacio libre,  $L_{bf}$ ; la pérdida por difracción del tejado a la calle,  $L_{rst}$ , producida en el interior de la calle en la que se encuentra el receptor, como resultado de la difracción en el tejado adyacente a éste; y la pérdida por difracción multipantalla  $L_{msd}$ , producida por múltiples difracciones en los tejados de los edificios situados a lo largo del trayecto.

Para ello tenemos que  $L_{bf}$  :



$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log (d \text{ Km}) + 20 \log (f \text{ Mhz})$$

Reemplazando  $d = 1\text{Km}$  y  $f = 1700\text{Mhz}$  (Frecuencia Down Link)

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log (1) + 20 \log (1700 \text{ Mhz})$$

$$L_{bf} = 32,4 + 0 + 64,61$$

$$L_{bf} = 97.01\text{dB}$$

Para determinar las Pérdida por difracción y dispersión del techo a la calle ( $L_{rts}$ ) tenemos que hallar  $L_{ori}$  de la siguiente manera:

$$L_{rts} = -8,2 - 10 \log (w) + 10 \log (f) + 20 \log (\Delta hm) + L_{ori} \quad \text{ec. 6}$$

- $W$ : Ancho de la calle, se puede considerar la mitad de la separación de edificios ( $b$ )
- $W = b/2$ . También se puede considerar  $b = (10 \text{ a } 50\text{m})$   
Para nuestro diseño considerar  $b=10$ .
- $\Delta hm = h_r - h_m$
- $h_r$ : Altura de los edificios definido como 3m por el número de pisos.
- $h_m$ : Altura de estación móvil (UE) 1,5 m [19]

Condición para  $L_{rts} \leq 0$ , se toma  $L_{rts} = 0$

Se tiene que los valores de  $L_{ori}$  depende de  $\varphi$  ( $\varphi$  ángulo entre el rayo directo y el eje de la calle).

$$L_{ori} = \{-10 + 0,345\varphi \quad ; \quad 0 < \varphi < 35^\circ\}$$

$$L_{ori} = \{ -2,5 + 0,075(\varphi - 35^\circ) \quad ; \quad 35 < \varphi < 55^\circ\}$$

$$L_{ori} = \{ -4 + 0,114(\varphi - 55^\circ) \quad ; \quad 55 < \varphi < 90^\circ\}$$

Consideramos:  $\varphi = 70^\circ$ ,  $L_{ori} = 5.71$

De la ecuación 6 reemplazamos:

$$L_{rts} = -8,2 - 10 \log(5) + 10 \log(1700) + 20 \log(1.5) + 5.71$$

$$L_{rts} = 22.63 \text{dB}$$

$L_{msd}$  : Pérdida por difracción multi-pantalla, permite tener evaluar la difracción multi obstáculo entre el dispositivo móvil y la estación base.

$$\text{Si } L_{msd} \leq 0 \rightarrow L_{msd} = 0$$

$$L_{msd} = L_{bsh} + K_a + K_d * \log(d) + K_f * \log(f) \quad \text{ec. 7}$$

Sabiendo que:  $L_{bsh}$  perdida por separación de edificios

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log(1 + \Delta hb) & \dots \text{para } hb > h \\ 0 & \dots \text{para } hb \leq h \end{cases}$$

- $hb$  Altura de la estación
- $h$  Altura del edificio.
- Donde  $ka$  representa el incremento de pérdidas de propagación en el caso en que las antenas de las estaciones base estén por debajo de los edificios adyacentes.
- $L_{bsh}$  perdidas por separación de edificios.
- $kd$  y  $kf$  ajustan la dependencia de la difracción en función de la distancia y la frecuencia. [20]
- $h$  Altura del edificio.

$$ka = \begin{cases} 54 & \text{para } hb > h \\ 54 - 0,8\Delta hbase & \text{para } d \geq 0,5Km \quad hb \leq h \\ 54 - 0,8\Delta hbase \frac{d}{0,5} & \text{para } d < 0,5Km \quad hb \leq h \end{cases}$$

$$kd = \begin{cases} 18 & \text{para } hb > h \\ 18 - 15 \frac{\Delta hb}{h} & \text{para } hb \leq h \end{cases}$$

$$Kf = -4 + \begin{cases} 0,7 \left( \frac{f}{925} - 1 \right) & \text{para una ciudad media y áreas sub urbanas} \\ 1,5 \left( \frac{f}{925} - 1 \right) & \text{para áreas metropolitanas} \end{cases}$$

$$Lbsh = -29.03$$

$$Ka = 54$$

$$Kd = 18$$

$$Kf = -3.41$$

Reemplazando los valores en la ecuación 7 obtenemos:

$$Lmsd = -29.03 + 54 + 18 \log(1) - 3.41 \log(1700)$$

$$Lmsd = -24.97 - 11.02$$

$$Lmsd = -35.99 \text{dB}$$

Finalmente reemplazamos los valores obtenidos:

$$Lb = Lbf + Lrts + Lmsd$$

$$Lb = 97.01 + 22.63 + 13.95$$

$$Lb = 133.59$$

Frecuencia(Km)	Distancia(Km)	Perdidas en el espacio libre
1700	1	133.59
2100	1	140.74

**Tabla 8: Método COST231 WALFISH-IKEGAMI, Frecuencia 1700Mhz - 2100Mhz**

### **3.3. CÁLCULO DE COBERTURA (LINK BUDGET)**

Se procederá a calcular las pérdidas por Propagación en el Espacio Libre. Para ello nos basamos en los parámetros del Transmisor del Usuario de Equipo, la potencia máxima de transmisión, la ganancia de la antena de transmisión, perdidas del cuerpo y la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente, Esto se realiza analizando el presupuesto del enlace (LINK BUDGET) tanto para el Uplink como para el Downlink.

Cabe mencionar además que se desea diseñar una red LTE para los distritos de Piura y castilla. Los servicios a ser implementados son Internet y VoIP tanto en el sector residencial como en el sector corporativo.

A continuación se enumera una serie de premisas básicas que son necesarias para el proyecto.

- a. Todos los usuarios comprarán el servicio de VoIP y el de acceso a Internet
- b. El factor de reventa en VoIP es siempre 1,  $FRVRES\_VoIP=1$ ,  $FRVEMP\_VoIP=1$
- c. El factor de reventa para Internet residencial es variable y lo ajusta el operador. A los usuarios residenciales se les vende un PIR (Peak Information Rate)
- d. El factor de reventa para Internet empresarial es 1 ya que a las empresas se les vende un CIR (Committed Information Rate),  $FRVEMP\_INTER=1$
- e. La QoS de VoIP debe ser similar a la de la PSTN, por lo tanto debe diseñarse para una probabilidad de bloqueo del 1%, en todos los casos.
- f. Modo de transmisión Duplex

En las Tablas N°09 y N°10 se detallan, las especificaciones técnicas de los equipos tanto en el Uplink como en el Downlink.

Asimismo en la tabla N°11 se observa la configuración de transmisión

Tabla 09: Parámetros Equipos Downlink

<b>Características de TX del Node B LTE</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Banda de trabajo LTE	NA	1
Identificador de canal (NDL, NUL)	NA	(50, 18050)
Frecuencia de portadora DL	MHz	2120
Frecuencia de portadora UL	MHz	1930
Ancho de Banda	MHz	18
Potencia de transmisión PTX	dBm	41,46
Ganancia elemento radiante	dBi	15
Elementos del arreglo de antenas	NA	2
Ganancia por elementos del arreglo	dB	0
Ganancia por Beam Forming	dB	0
Ganancia por sistema MIMO	dB	3,01029996
Figura de ruido	dB	5
Altura de la antena	m	33
<b>Características de Rx del Móvil LTE</b>		
Ganancia de cada Elemento Radiante de la Antena en Reception	dBi	0
Cantidad de Elementos del Arreglo	NA	2
Ganancia debida al Arreglo (Diversidad de Antenas)	dB	0
Cantidad de RBs asignados al UE	NA	100
Ancho de Banda	MHz	18
Figura de Ruido en el Receptor	dB	9

Tabla 10: Parámetros Equipos Uplink

<b>Características de TX de Mobile Station</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Banda de trabajo LTE	NA	1
Identificador de canal (NDL, NUL)	NA	(50, 18050)
Frecuencia de portadora DL	MHz	2120
Frecuencia de portadora UL	MHz	1930
Cantidad de RBs asignados al UE	NA	10
Ancho de Banda	MHz	1,8
Potencia de transmisión PTX	dBm	23
Ganancia elemento radiante	dBi	0
Elementos del arreglo de antenas	NA	1
Ganancia por elementos del arreglo	dB	0
Ganancia por Beam Forming	dB	0
Ganancia por sistema MIMO	dB	0
Figura de ruido	dB	9
Altura de la antena	m	1,7

Características de Rx de la Base Station		
Ganancia de cada Elemento Radiante de la Antena en Reception	dBi	15
Cantidad de Elementos del Arreglo en RX	NA	2
Ganancia debida al Arreglo (Diversidad de Antenas)	dB	3,01029996
Figura de Ruido en el Receptor	dB	5

Tabla 11: Configuración de transmisión (Ancho de banda)

[Elaboración Propia]

Ancho de Banda (MHz)	Número Máximo de RBs (TRANSMISSION BANDWIDTH CONFIGURATION)	Maximo Ancho de Banda Utilizable
1,4	6	1,08
3	15	2,7
5	25	4,5
10	50	9
15	75	13,5
20	100	18

### 3.3.1. Datos geográficos de la zona del proyecto

Los datos de población de ambos distritos y superficie total han sido extraídos según INEI y de los planes estratégicos de ambos, cabe mencionar que en este estudio se está incluyendo al distrito de 26 de Octubre o sea antes de la división.

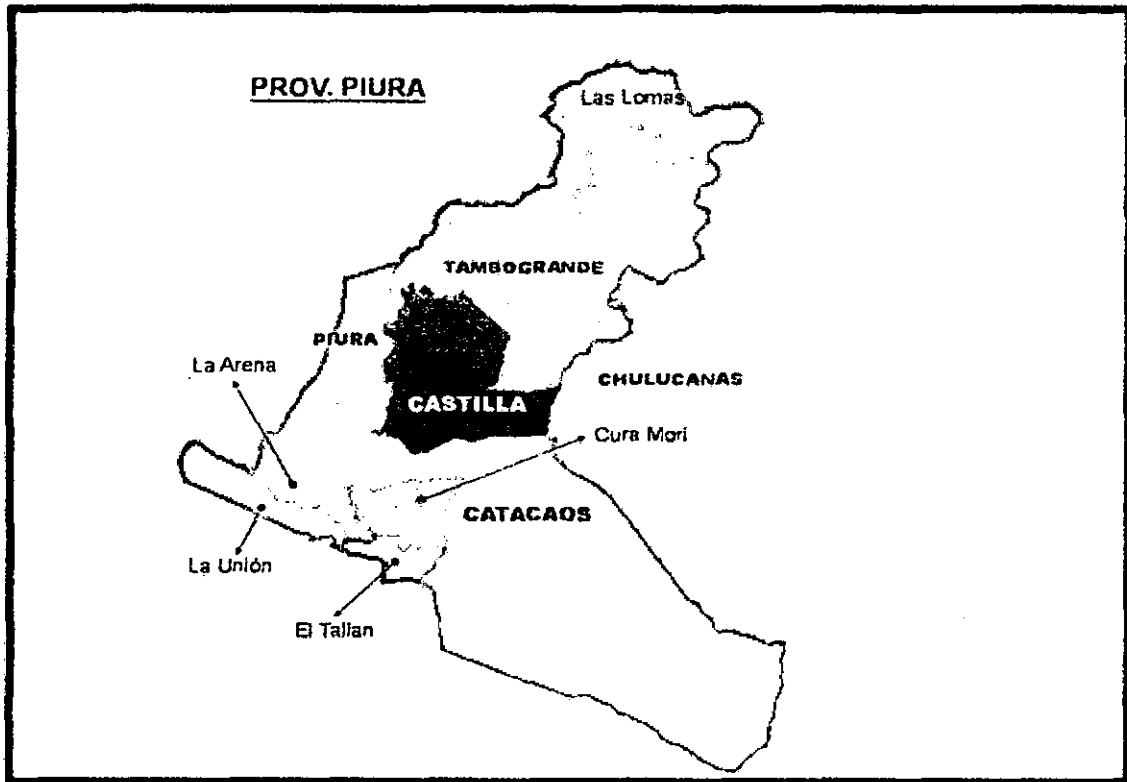
Tabla 12: Población y Superficie de la zona del proyecto

Distrito	Población (2013)	Superficie Total (Km <sup>2</sup> )
Piura (inc 26 Octubre)	377,496	330.32
Castilla	139,134	662.23
TOTAL	516,630	992.55

Fuente: INEI.

Figura 33: Distrito de Piura y Castilla

Fuente: [www.municastilla.gob.pe](http://www.municastilla.gob.pe)



### 3.3.2. Link Budget

#### 3.3.2.1. Cálculo de la Sensibilidad del Receptor para cada modulación

La sensibilidad está dada por la siguiente expresión:

<h2 style="margin: 0;">Sensibilidad</h2>	<p>Donde:</p> <p>S: Sensibilidad Watts</p> <p>T: Temperatura en grados Kelvin 290 °K</p> <p>K: Constante de Boltzman 1.3806E-23 joules/°K</p> <p>BW: Ancho de banda del canal en Hz</p> <p>NF: Figura de ruido del receptor, sin unidades</p>
--	---

$$S_{dBm} = SNR_{dB} + 10\log(KT / 1mW)_{dBm/Hz} + 10\log(BW)_{dB*Hz} + NF_{dB}$$

Tabla 13: Inputs para hallar la sensibilidad

Constantes	
Constante de Boltzman J/°K	1,38E-23
Temperatura en grados Kelvin °K	290
Ancho de banda de la BS en MHz	18
Ancho de banda del UE en MHz	1,8
Figura de ruido del Receptor del UE dB	9
Figura de ruido del Receptor de la BS dB	5

Así es posible hallar la sensibilidad en función de la modulación y la codificación utilizada. Dicha información será posteriormente utilizada para el cálculo de los anillos de cobertura. Cabe señalar que los valores obtenidos son teóricos calculados en base al estándar, en un despliegue real la sensibilidad del equipo receptor tanto en el Uplink como en el Downlink se obtiene de la hoja técnica del equipamiento (estaciones móviles y estaciones base).

Tabla 14: Sensibilidad en función de la modulación y codificación

Sensibilidad en función de la Modulación y Codificación				
Modulación	Tasa de Codificación	SINR en Rx (dB)	Sensibilidad en el UE (dBm)	Sensibilidad en la BS (dBm)
QPSK	1/8	-5,1	-100,523	-114,523
	1/5	-2,9	-98,323	-112,323
	1/4	-1,7	-97,123	-111,123
	1/3	-1	-96,423	-110,423
	1/2	2	-93,423	-107,423
	2/3	4,3	-91,123	-105,123
	3/4	5,5	-89,923	-103,923
	4/5	6,2	-89,223	-103,223
16-QAM	1/2	7,9	-87,523	-101,523
	2/3	11,3	-84,123	-98,123
	3/4	12,2	-83,223	-97,223
	4/5	12,8	-82,623	-96,623
64-QAM	2/3	15,3	-80,123	-94,123
	3/4	17,5	-77,923	-91,923
	4/5	18,6	-76,823	-90,823



### 3.3.2.2. Radio de Cobertura de la Celda

Se utilizará el modelo de propagación COST231-HATA. Considerando que Piura y Castilla son zonas urbanas utilizaremos  $C=3$ . Las ecuaciones pertenecientes al modelo son las siguientes:

$$L_p = 46.3 + 33.9 \log(f_p) - 13.82 \log(h_{BS}) - a(h_{MS}) + (44.9 - 6.55 \log(h_{BS})) \log_{10}(d) + C$$

$$C = \begin{cases} 0 \\ 3 \end{cases}$$

$$a(h_{MS}) = (1.1 \log f - 0.7) h_{MS} - (1.56 \log f - 0.5)$$

Para el cálculo de los anillos de cobertura, se considera tanto el límite superior como el inferior de los niveles de sensibilidad calculados anteriormente. Se realizó el cálculo del radio de cobertura tanto en el Uplink como en el Downlink, así es posible determinar cuál es el enlace dominante.

Tabla 15: Radio de Cobertura en el Downlink

Anillos de Cobertura	Ganancia del Sistema	MAPL	Radio de Cobertura
QPSK (Límite Superior)	dB 161,99	151,99	2,101
QPSK (Límite Inferior)	dB 148,99	138,99	0,892
16-QAM (Límite Superior)	dB 148,99	138,99	0,892
16-QAM (Límite Inferior)	dB 141,59	131,59	0,548
64-QAM (Límite Superior)	dB 141,59	131,59	0,548

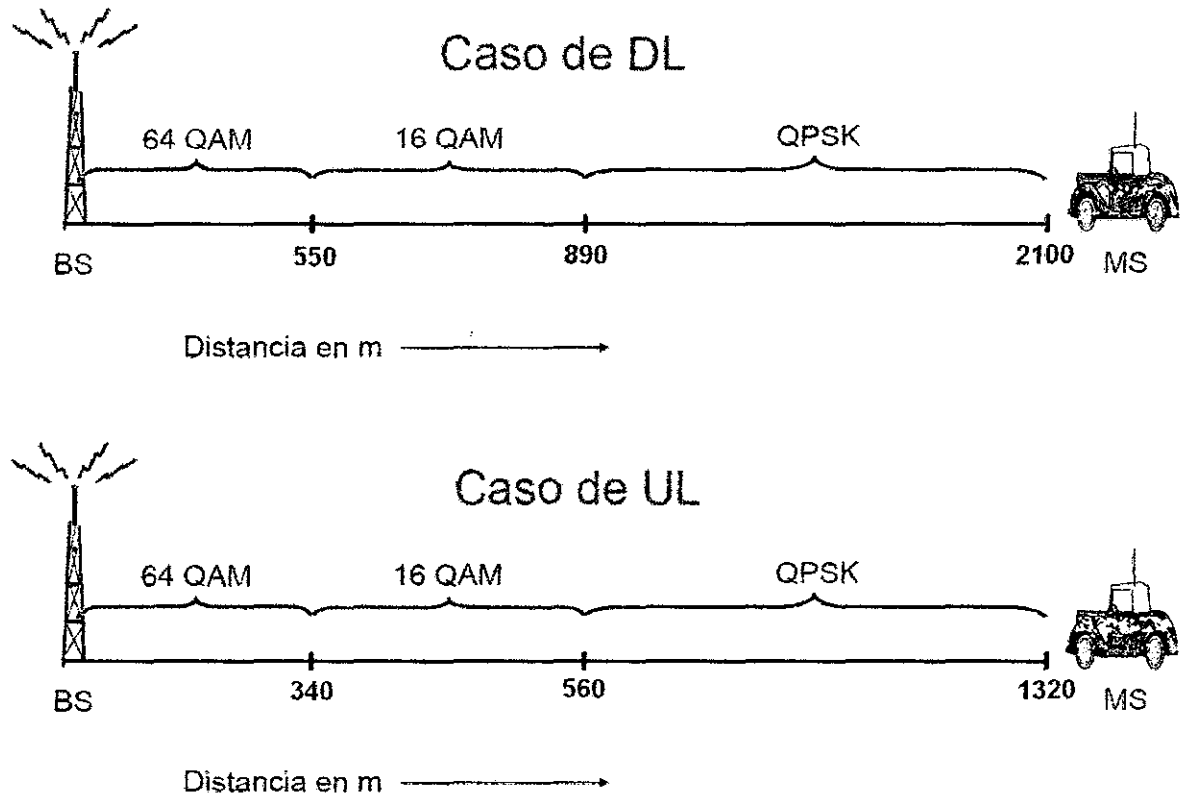
Tabla16: Radio de Cobertura en el Uplink

Anillos de Cobertura	Ganancia del Sistema	MAPL	Radio de Cobertura
QPSK (Límite Superior)	dB 153,52	143,52	1,316
QPSK (Límite Inferior)	dB 140,52	130,52	0,559
16-QAM (Límite Superior)	dB 140,52	130,52	0,559
16-QAM (Límite Inferior)	dB 133,12	123,12	0,343
64-QAM (Límite Superior)	dB 133,12	123,12	0,343

Se observa que el radio de cobertura es mayor, cuando se utiliza un nivel de modulación más bajo. En el enlace de bajada la celda alcanza un radio de cobertura de 2100 m, mientras que en el enlace ascendente dicho valor es de 1320m. En este

caso, el enlace dominante es el Uplink, y será utilizado para calcular el área de cobertura total y de los tres anillos.

Figura N° 34: Radios de cobertura en el Uplink y Downlink



Cabe señalar que en el uplink no se considera equipos categoría 5, por tanto solo se tendrá dos anillos de cobertura: 16QAM y QPSK.

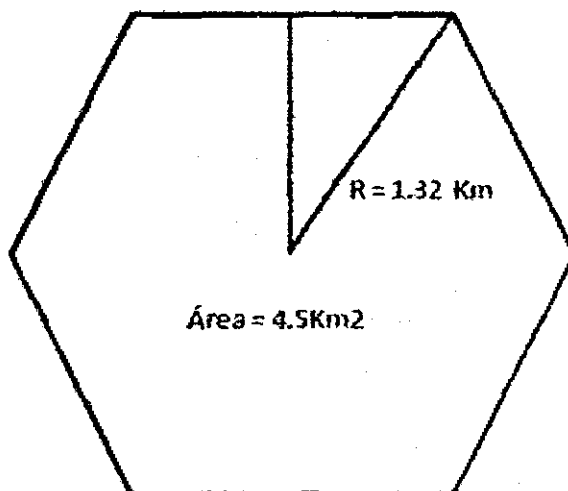
### 3.3.2.3. Área de Cobertura de la Celda Hexagonal

Para el cálculo del área de cobertura total de la celda, se procede a utilizar la ecuación del área del hexágono:

$$\begin{aligned} Area &= 3 \frac{\sqrt{3}}{2} R^2 = 2\sqrt{3} a_p^2 \\ Area &= 2.598 R^2 \\ Area &= 3.4641 a_p^2 \end{aligned}$$

Y así se obtiene que para un radio de cobertura máximo de 1.32Km, el área a ser cubierta es de 4.5Km<sup>2</sup>.

Figura N° 35: Radio de Cobertura y Área de Cobertura



#### 3.3.2.4. Anillos de Cobertura para cada modulación

Ahora se procede a calcular cual es el área de los tres anillos de cobertura (QPSK, 16-QAM y 64-QAM).

Tabla 17: Anillos de Cobertura

Anillos de Cobertura	Radio Final (Km)	Área del Anillo (Km2)	Área de Cobertura (Km2)	% del Área Total de modulación
QPSK (Límite Superior)	1,32	3,69	4,50	81,96%
QPSK (Límite Inferior)	0,56			
16-QAM (Límite Superior)	0,56	0,51		11,23%
16-QAM (Límite Inferior)	0,34			
64-QAM (Límite Superior)	0,34	0,31		6,80%

#### 3.3.3. Capacidad del UPLINK y DOWLINK

##### 3.3.3.1. Cantidad de Recursos para cada modulación

En un ancho de banda de 20MHz se tiene 100 RBs (Bloques de Recurso). Dichos bloques de recurso deben ser repartidos en función al área que presentan los tres anillos de cobertura. Para el cálculo de la capacidad se tendrá en cuenta los siguientes puntos:

- Se considerará un escenario pesimista, es decir: Símbolos OFDMA para el PDCCH = 3.
- No se está considerando equipos terminales Categoría 5
- En el caso de 2 antenas en TX DL, se utilizan 12 Elementos de Recurso para estimación de canal y quedan 120 RE para datos.

Tabla 18: Capacidad del uplink y downlink

Modulación	DL			UL		
	RBs	REs	Peak Rate (Mbps)	RBs	REs	Peak Rate (Mbps)
QPSK	82	9840	19.68	82	11808	23.62
16-QAM	11	1320	5.28	18	2592	10.37
64-QM	7	840	5.04	NA	NA	NA
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>12000</b>	<b>30.00</b>	<b>100</b>	<b>14400</b>	<b>33.98</b>

### 3.3.3.2. Capacidad total del Uplink y del Downlink

Como en el DL hay MIMO 2x2, entonces la tasa obtenida en la Tabla N°09, se multiplica por 2: Así el Peak Rate final para el DL es de: **60Mbps**. Para el caso del Uplink la tasa es de 33.98Mbps.

Cabe señalar que la capacidad de **60 Mbps** es por sector. Así, como veremos más adelante, es posible escoger ya sea una celda de un único sector, o en todo caso sectorizar la celda de acuerdo a los requerimientos por capacidad.

### 3.3.3.3. Cálculo de la cantidad de Estaciones Base para cubrir la demanda de usuarios residenciales y comerciales

En primer lugar, debemos tomar en cuenta los datos generales de la ciudad de Lima que serán útiles para calcular la cantidad de clientes potenciales que tendremos:

Tabla 19: Datos referenciales Distritos Piura y Castilla

Población total distritos de Piura y castilla	516,630
Clientes Residenciales (5%)	25,831.5

Población Económicamente Activa (con trabajo)	148,293
Cientes Comerciales (1%)	<b>1483</b>

Para estimar la demanda que debemos satisfacer con nuestro servicio, se han tomado datos de la gerencia de mercado de un operador respecto a la cantidad de clientes tanto a nivel residencial como a nivel comercial con los que contaremos. Dicho estudio menciona que tanto la cantidad de clientes residenciales con Internet como con servicio de VoIP será del 5% de la población total. Por otro lado, la cantidad de clientes comerciales tanto regular como Premium será igual al 1% de la población económicamente activa. En resumen, la cantidad de clientes según el servicio adquirido y el perfil del mismo se muestran en el siguiente cuadro:

Tabla 20: Capacidad por servicio

Capacidad por servicio (Mbps)	Capacidad (Mbps)	Factor de sobreventa	Cantidad Total de Clientes Potenciales
Internet Residencial	0.5120	40	25,832
VoIP (AMR FR 12.2Kbps)	0.0107	1	25,832
PYME Regular	0.5120	1	1483
Pyme Premium	2.0000	1	1483

#### 3.3.3.4. Tasa VoIP:

De los datos mostrados en la tabla anterior, nos hace falta calcular la tasa de bits del servicio de VoIP considerando el códec AMR full rate. Para esto, lo primero que debemos calcular es el tamaño de la cabecera de la trama de VoIP, donde se consideran la cabecera RTP, UDP, IPv6 y las correspondientes a la capa 1 y capa 2 de la tecnología LTE.

Tabla 21: Header Capa 3

<b>RTP</b>	12 Bytes
<b>Header UDP</b>	8 Bytes

<b>Encabezado IPv6</b>	<b>40 Bytes</b>
<b>Total Header L3</b>	<b>60 Bytes</b>

Dado que nuestros dispositivos deben soportar VoIP y utilizan la tecnología LTE, es obligatorio utilizar RHCO (Robust Header Compression), que comprime las cabeceras correspondientes a partir de capa 3. Dicho estándar de compresión, puede comprimir dichas cabeceras en un factor de 10, por lo que la cabecera mostrada en la tabla anterior podría reducirse de 60 Bytes a 6 Bytes. Por otro lado, tenemos que la cabecera correspondiente a la capa 1 y capa 2 viene dada de la siguiente manera:

Tabla 22: Header Capa 1 y 2

<b>PDCP (Seguridad)</b>	<b>2 Bytes</b>
<b>RLC</b>	<b>2 Bytes</b>
<b>MAC</b>	<b>3 Bytes</b>
<b>Capa 1 (RLC)</b>	<b>2 Bytes</b>
<b>Total Header Capa 1 y 2</b>	<b>9 Bytes</b>

Por lo tanto, obtenemos que la cabecera de VoIP es de **15 Bytes**.

Como bien sabemos, el Códec AMR posee un sistema de detección automática de voz (VAD), el mismo que detecta los periodos de silencio y envía ruido de confort, haciendo que disminuya la cantidad de bits transmitidos en estos periodos de silencio. Dadas estas condiciones, debemos obtener la tasa tanto del periodo donde hay voz como del periodo donde hay silencio.

En el caso del periodo donde hay voz, tenemos que el tamaño de la trama AMR full rate es de 33 Bytes, que sumados a la cabecera hallada anteriormente tenemos un tamaño total de **48 Bytes**. La duración de una trama de voz es de 20ms, por lo que la tasa en los periodos donde hay voz es de:

$$(48 \times 8)/0.02/1000 = \mathbf{19.2 \text{ Kbps}}$$

Por otro lado, la longitud de la trama de ruido de confort es de 58 bits, por lo que sumándole los 120 bits de la cabecera hallada (15 Bytes), obtenemos un tamaño total de 178 bits. Se sabe que las tramas de ruido de confort se transmiten cada 160ms durante el silencio, por lo que la tasa en este periodo será de:

$$178/0.16/1000 = \mathbf{1.1125 \text{ Kbps}}$$

Para calcular la tasa del servicio de VoIP debemos ponderar los valores hallados respecto a periodos tanto de voz como actividad en una llamada. Para esto, estamos utilizando como referencia un experimento de 10 llamadas de 15 minutos cada una donde se determinó considerar periodos de actividad de voz de 1026 ms y periodos de silencio de 1171 ms, por lo que ponderando cada una de las tasas halladas respecto a los tiempos indicados obtenemos lo siguiente:

$$Tasa \text{ bits VoIP} = \frac{((1026 + 140) \times 19.2) + ((1171 - 140) \times 1.1125)}{1026 + 1171}$$

$$\mathbf{Tasa \text{ bits VoIP} = 10.71197 \text{ Kbps}}$$

### 3.3.3.5. Cantidad máxima de usuarios residenciales

Tabla 23: Data

Servicio	Tasa Kbps	Factor de Reventa	%Mix
VoIP	10.71197	1	70
Internet	512	40	100

$$N_{USER\_RES} = \frac{C_{UTIL}}{P_{VOIP} C_{RES\_VOIP} + P_{INTER} C_{RES\_INTER}}$$

Considerando un factor de utilización de 85%:

$$N = \frac{51}{0.7(10.71197) + 1(512)}$$

La cantidad de usuarios residenciales es de 98 usuarios.

Tabla 24: Cálculo del número de Clientes

Servicio	Cantidad de usuarios	%MIX	Cantidad de Usuarios Simultáneos	Aplicando la Reventa
VoIP	98	70	68	68
Acceso de Internet	98	100	98	3920

Entonces se puede vender el servicio de acceso a internet a 3920 clientes. Sin embargo para VoIP es diferente. Se considera que una llamada en promedio dura 3.5 minutos, lo que equivale a 58.3mE. Y seleccionamos una probabilidad de bloqueo de 1% como se usa en la PSTN.

Usando una calculadora Erlang tenemos:

Figura N° 36: Erlang Calculator

**Erlang B Calculator**

BHT (Erl.)      Blocking      Lines  
 Unknown      Unknown      Unknown  
 54.250      0.010      68

Calc.      Results      Help

Un tráfico total de 54.250 Erlang, por lo que si cada usuario ofrece un tráfico de 58.3mE entonces se puede ofrecer el servicio a 930 usuarios.

Resumiendo, se puede vender internet a 3920 clientes y el de VoIP a 930 usuarios, y tendremos 98 usuarios concurrentes de internet y 68 de VoIP

### 3.3.3.6. Cálculo de capacidad y densidad de datos

En el caso de los usuarios residenciales, lo primero que calculamos es la cantidad de circuitos necesarios para atender llamadas de 3.5 minutos con una probabilidad de



bloqueo de 1 % considerando la cantidad de clientes hallada anteriormente para el servicio de VoIP (25,832 clientes). Utilizando la calculadora de Erlang B obtenemos lo siguiente:

Tabla 25: Parámetros de tráfico

Duración de una llamada	3.5
Trafico individual ofrecido VoIP	58.33
Tráfico total ofrecido	1506.84
<b>Cantidad de circuitos según Erlang B</b>	<b>26014</b>

Luego de esto, podemos calcular la capacidad requerida tanto para Internet como para VoIP para los usuarios residenciales:

Tabla 26: Capacidad Utilizada por los clientes residenciales

Tipo de Servicio	Capacidad (Mbps)	Cantidad de clientes	Factor de reventa	Clientes concurrentes	Consumo (Mbps)
Internet	0.512	25831.5	40	645.78	330.64
VoIP	0.010711965	25831.5	1	26014	278.66
<b>Total Residencial</b>					<b>609.30</b>

Luego, repetimos el mismo procedimiento con los usuarios corporativos:

Tabla 27: Capacidad Utilizada por los clientes Corporativos

Tipo de Servicio	Capacidad CIR (Mbps)	Cantidad de clientes	Factor de reventa	Clientes concurrentes	Consumo
PYME Regular	0.512	1483	1	1483	759.30
PYME Premium	2	1483	1	1483	2966.00
<b>Total PYME</b>					<b>3725.30</b>

Finalmente, considerando los resultados de capacidad requerida, obtenidos tanto para los clientes comerciales como residenciales, y la superficie de ambos distritos, podemos obtener la densidad de datos, la misma que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 28: Resultados

Capacidad Residencial	609.30 Mbps
Capacidad Comercial	3725.30 Mbps
Capacidad Total	4334.60 Mbps
Densidad de Datos	4.37 Mbps/Km <sup>2</sup>

Con el cálculo de la densidad de datos podemos calcular la capacidad requerida que debe tener la estación base, de acuerdo al radio de cobertura calculado anteriormente (basado en las condiciones dadas). Dicha capacidad viene dada por:

$$C_{BS\_MAX} = \frac{D_{DATOS} \times A_{BS}}{FU}$$

Tenemos que la densidad de datos es de 4.37 Mbps/Km<sup>2</sup> y el factor de utilización considerado es de 85%. Asimismo, de cálculos anteriores tenemos que el área de la estación base es de 4.50 Km<sup>2</sup>. Por lo que la capacidad requerida que debe tener la estación base es de:

$$C_{BS\_MAX} = 23.12 \text{ Mbps}$$

Como se puede observar, dicha capacidad es menor a la obtenida con el Link Budget (60Mbps), por tanto no es necesario sectorizar.

### 3.3.3.7. Cálculo del número de Estaciones Base

Finalmente calculamos el número de estaciones base que se requiere:

$$N_{BS} = \frac{A_{TOTAL}}{A_{BS}}$$

$$N_{BS} = \frac{992.55}{4.5}$$

$$N_{BS} = 220.57$$

Con lo que concluimos que para elaborar nuestra red requerimos contar con **221 estaciones base**.

## Conclusiones

- En el diseño de una red LTE para los Distritos de Piura y Castilla se consideró un modelo de propagación adecuado para zonas urbanas, dicho modelo se implementó en el link Budget tanto en el uplink como downlink, se calculó la sensibilidad en función de la modulación y codificación y se calculó el área de cobertura que tendrá cada estación
- Se evaluó la capacidad de las BTS en función de la modulación empleada en los equipos, la tasa de velocidades en bits, capacidad en Mbps, factor de sobreventa, cantidad de usuarios simultáneos, densidad de los datos, logrando una capacidad por BTS de 23.12 Mbps.
- En función cálculo del área de cobertura de una BTS y el área geográfica total a cubrir entre los distritos de Piura y castilla se calculó la cantidad de estaciones radio base necesaria arrojando 221 ERB's. Siendo la capacidad en dowlink de 60 Mbps debido al uso de sistema Mimo 2x2 no es necesario sectorizar las ERB's ya que para el servicio ofrecido necesitamos 23.12 Mbps, pero de hacerlo en tres sectores se podría llegar a capacidades de downlink de hasta 180Mbps

## **Recomendaciones**

- Para el diseño de la red de radio se recomienda utilizar equipos de última tecnología que puedan ser capaces de ofrecer otros servicios.
- Se recomienda un estudio para una red de transporte mediante Fibra Óptica, con un mejor ancho de banda, ofreciendo diversos servicios, permitiendo más transmisión de data.
- Es recomendable realizar un buen estudio de campo para la correcta ubicación de las ERB's, aquí hay que considerar el aspecto social ya que es un gran problema al momento de desplegar la red

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Martínez, E. (2001). La evolución de la telefonía móvil - La guerra de los Celulares. Revista RED.
- [2] Inzaurrealde, M., Isi, J., & Garderes, J. (2010). TELEFONIA CELULAR.
- [3] Telefonía celular, Wikipedia, 2015.
- [4] 2008 por L. Scott Harrell: Localización de los teléfonos móviles
- <http://pursuitmag.com/locating-mobile-phones-through-pinging-and-triangulation>.
- [5] Antennas and propagation, Ian Poole, University College London
- <http://www.radio-electronics.com/info/antennas/mimo/formats-siso-simo-miso-mimo.php>
- [6] Multi-user MIMO, 2007. Wikipedia,
- [7] José Manuel Huidobro, 2012. Comunicaciones Móviles Sistema GSM, UMTS y LTE.
- [8] Sistema 4G, 2016. JOSE ESPINOZA
- [www.slideshare.net/Roymeine/sistema-4g](http://www.slideshare.net/Roymeine/sistema-4g).
- [9] Jim Zyren, 2007. "Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer" PAPER.
- [10] Juan Antonio Villalpando, 2013. Televisión Digital.
- [http://www.iesromerovargas.es/recursos/elec/sol/television\\_digital.htm](http://www.iesromerovargas.es/recursos/elec/sol/television_digital.htm)
- [11] Teleco, 2015. Ingeniería.
- [http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialradioscognitivos2/pagina\\_2.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialradioscognitivos2/pagina_2.asp)
- [12] Leah Kerr, 2014 Mobile Communication System .
- <http://slideplayer.com/slide/1273079/>
- [13] Banda Ancha Ginebra, 2013. Foro Mundial de Política de las Telecomunicaciones/TIC.
- <https://www.itu.int/en/wtpf-13/Documents/backgrounder-wtpf-13-broadband-es.pdf>
- [14] Bandas de frecuencias asignadas a LTE-FDD LTE; 3GPP TS 36.101 Versión 8.9.0 Release 8, 2010 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception.
- [15] Abel Mellado, 2014. Infraestructura de Telecomunicaciones para Smart & Sustainable Cities MTC.

- [16] Rec. UIT-R P.525-2. (1978-1982-1993) CÁLCULO DE LA ATENUACIÓN EN EL ESPACIO LIBRE.
- [17] Rodrigo Rojas R. (2011), Modelos de propagación.
- [18] Reinier Alonso Quintana, Estudio comparativo de los modelos de Propagación de canal inalámbrico RIELAC 2013 p.12-26.
- [19] Rec. ITU-R M.1641. 2003. Simplified model of an extended version of Hata's model ,
- [20] José Osorio L., 2002. Modelo de propagación de ondas Electromagnéticas ara comunicaciones móviles en Banda UHF en la Ciudad de Mexico.
- [21] Harri Holma and Antti Toskala 2009. "LTE for UMTS - OFDMA and SC FDMA Based Radio Access"pag.224,
- [22] Jaime Analuisa. Diseño de una red 4G Long Term Evolution (LTE) en redes móviles,2014
- [23] MARCANO DIÓGENES. Dimensionamiento de una red LTE para la Provincia de Lima, 2011.
- [24] HUAWEI TECHNOLOGIES CO, 2013, LTD. Hardware Description.
- [25] Huawei, 2014. Guía de Instalación.
- [26] Municipio de Lancones, 2014. DIAGNOSTICO SITUACIONAL DEL DERECHO AL AGUA EN EL DISTRITO DE LANCONES, REPORTE DE AVANCE OCTUBRE 2014.
- [27] José Taipe, Tecnologías, servicios y arquitecturas 4G y 5G. Enero 2016
- INEI. Perú: Estimaciones y Proyecciones de Población por Sexo, Según Departamento, Provincia y Distrito, 2000-2015. Boletín Especial N°18. Lima, Diciembre de 2009-INEI.
- Registro Nacional de Frecuencias. Ministerio de Trasportes y Comunicaciones. <http://www.mtc.gob.pe/comunicaciones/frecuencias/index.asp>
- Milla Cazana, José Alejandro (2012). *Diseño de una red LTE para el Distrito del Callao*. Universidad Pontificia Católica del Perú
- Guinand Salas, Cristina Eugenia (2012). *Planificación de una red LTE con la herramienta ATOLL y análisis del impacto de las estrategias de packet scheduling*. Escuela técnica superior de Ingeniería de Telecomunicación de Barcelona de la Universidad Politécnica de Catalunya. España

- Manosalvas Barriga, Henry V. & Santamaría Naranjo, Adriana L. (2012). *Estudio, diseño y simulación de una red LTE (Long Term Evolution) para telefonía móvil en los valles de Tumbaco y los Chillos utilizando software predictivo*. Escuela Politécnica del Ejército. Sangolqui. Ecuador
- MOBILE TECHNOLOGY. Documento: "3G Long Term Evolution: A Short History". Octubre. 2010. URL: <http://antonis-hontzeas.suite101.com/3g-long-term-evolution-a-short-history-a293167> Última fecha de consulta: 22 de Noviembre del 2011.
- 3GPP LTE. Documento: "3GPP LTE – Long Term Evolution". Junio. 2010. URL: <http://3gpplte-longtermevolution.blogspot.com>. Última fecha de consulta: 26 de Noviembre del 2011
- MARCANO, DIÓGENES. "IMS – IP Multimedia Subsystem". Lima. 2011
- (<http://www.gsmamobileeconomy.com/#sthash.OJM7hLFe.dpuf>).